Grenoble INP PHELMA
Filière SMPB

Projet de Fin d'Étude
Année Universitaire 2008/2009

Surface Science Laboratory, ESRF

Polygone Scientifique Louis Néel, 6 rue Jules Horowitz
38000 Grenoble, FRANCE

DÉVELOPPEMENT D'UN COUPLAGE ENTRE UNE INTERFACE HAPTIQUE ET DEUX SONDES AFM A DIAPASON

Nicolas VENANT
<nicolas.venant@enspg.inpg.fr>

Maître de Stage : Florence MARCHI & Fabio COMIN
Adresse : florence.marchi@esrf.fr & fabio.comin@esrf.fr

Tuteur Ecole : Gilles ROSTAING
Adresse : gilles.rostaing@phelma.grenoble-inp.fr

Grenoble, 2 septembre 2009

Remerciements

Je remercie tout d'abord Florence MARCHI et Fabio COMIN pour m'avoir accueilli au SSL et pour m'avoir fait confiance sur le projet Nano-Pince. Je suis très heureux d'avoir participé à ce projet et d'avoir profité de l'expérience de ce groupe.

Je remercie également Joël CHEVRIER pour son aide et ses nombreux conseils qui ont permis l'avancement de mon travail.

J'adresse un remerciement tout particulier à Antoine NIGUES avec qui j'ai passé un grand nombre d'heures au laboratoire sur le projet Nano-Pince et j'espère que cette collaboration pourra continuer.

Je voudrais également profiter de cette page pour remercier Michal HROUZEK qui fut ma principale source de lumière dans le monde obscure de l'informatique industrielle.

Je remercie également tous les chercheurs et thésards que j'ai eu la chance de rencontrer au laboratoire : Alessandro, Wilfrid et Mario, pour leur convivialité et leur soutien tout au long de ce stage.

Je remercie finalement tous les autres stagiaires du SSL avec qui les journées de travail furent moins longues : Luca pour son exemple de patience et de persévérance, Michele pour sa folie (take care of your head), Hua pour les cours de Tai-chi-chuan et ses nombreuses histoires, Julien pour son attention et Thomáš, Miroslav et Alexandre.

Glossaire

ESRF European Synchrotron Radiation Facility
SSL Surface Science Laboratory
ICA Informatique et Création Artistique
AFM Microscopie à Force Atomique (Atomic Force Microscopy)
MEB/SEM Microscopie électronique à balayage/Scanning Electron Microscopy
TGR Transducteur Gestuel Rétroactif
DSP Processeur de Signal Numérique (Digital Signal Processor)
FPGA Réseau Logique Programmable (Field-Programmable Gate Array)
OS Système d'Exploitation (Operating System)
PLL Boucle à Verrouillage de Phase (Phase Locked Loop)
LVDT Linear Variable Differential Transformer
TCP/IP Transmission Control Protocol/Internet Protocol
PCI Peripheral Component Interconnect
CAN Convertisseur Analogique/Numérique

Table des matières

Remerciements **i**

Glossaire **ii**

Table des matières **iii**

European Synchrotron Radiation Facility **v**

Introduction **vii**

1 Nano-Pince : de la Microscopie à Force Atomique à la Nano Manipulation 3D **1**
1.1 Microscopie à Force Atomique . . . 2
1.1.1 Principe de la Microscopie à Force Atomique . . . 2
1.1.2 Nature des Forces à l'échelle nanométrique . . . 2
1.1.3 Les modes opératoires . . . 2
1.2 Présentation de l'X-AFM® . . . 4
1.2.1 Théorie du diapason . . . 4
1.2.2 Le diapason au coeur de l'X-AFM et de la Nano-Pince . . . 7
1.2.3 Fonctionnement de l'électronique de contrôle . . . 7
1.3 Un pas vers la Nano Manipulation . . . 10
1.3.1 L'état de l'art . . . 10
1.3.2 Les objectifs de la Nano-Pince . . . 11
1.3.3 Le montage mécanique de la Nano-Pince . . . 12

2 L'humain au centre du Nano Monde **14**
2.1 Intérêt et état de l'art de la nanomanipulation assistée haptiquement . . . 14
2.2 Le système TGR ERGOS . . . 15
2.2.1 Système de base ERGOS et performances . . . 15
2.2.2 Morphologie modulaire : Joystick 3D . . . 17
2.2.3 Électronique de contrôle ERGOS . . . 18
2.2.4 La carte DSP Toro . . . 20

3 Programmation de l'Interface TGR/AFM du projet Nano Pince **21**
3.1 État initial . . . 21
3.2 Description de l'interface *Nano-Pince* 0.1 . . . 24
3.2.1 Ergonomie du mouvement . . . 24
3.2.2 Déroulement du programme *Nano-Pince* 0.1 . . . 25
3.2.3 Les expériences réalisées, les limites observées . . . 29
3.3 Interface *Nano-Pince* 0.2, utilisation d'un DSP . . . 30
3.3.1 Présentation du DSP Sheldon Instruments . . . 30
3.3.2 Ergonomie du mouvement . . . 31
3.3.3 Déroulement du programme *Nano-Pince* 0.2 . . . 32
3.3.4 Les expériences réalisées . . . 37

3.4 Les Développements futurs 38
3.4.1 Le montage *Nano-Pince* 0.3 38
3.4.2 Retour de Force Tridimensionnel 38
3.4.3 Contrôle Numérique 39
3.4.4 Modélisation d'environnements *Nano-Pince* virtuels 39

Conclusion **40**

A Dynamic Mode AFM **41**

B Les forces à l'échelle nanoscopique **45**

C Fabrication des Pointes **47**

D Capteurs LVDT [2] **49**

E Le Langage CORDIS **51**
E.1 Les briques de CORDIS 51
E.2 Les équations de la physique 51
E.3 Un lien entre le monde réel et le monde virtuel 52
E.4 Exemples de Simulations 54

F Calcul des coefficients de la matrice de transposition entre les coordonnées (P_1, P_2, P_3) du mouvement de base ERGOS et les coordonnées cartésiennes (X,Y,Z) de l'espace **56**
F.1 Définition du repère 56
F.2 Montage 0.1 56
F.3 Montage 0.2 57

European Synchrotron Radiation Facility

Fig. 1 – Vue du site de l'ESRF

Depuis toujours l'homme cherche à connaître son environnement et, pour y parvenir, il invente de nouveaux outils. Certains sont destinés à étudier l'infiniment grand et d'autres à étudier l'infiniment petit. Le synchrotron de Grenoble fait partie de cette deuxième catégorie.

Il existe quelques dixaines de structures de ce type dans le monde, mais seules deux ont une énergie équivalente au synchrotron européen. Il s'agit de SPring 8 Japan et Advance Photon Source (A.P.S. U.S.A.). La particularité de l'ESRF est, comme son nom l'indique, d'être une structure gérée par un ensemble de partenaires provenant de 18 pays. Ses services sont mis à disposition des scientifiques et industriels du monde entier sur la base de projets communs ou de participations financières. Cette particularité est une richesse qui se traduit par une production scientifique très importante.

Il s'agit d'une véritable fourmilière : 600 personnes de nationalités différentes y travaillent toute l'année. Plus de 6000 utilisateurs du monde entier y viennent annuellement pour profiter de cette source de lumière X.

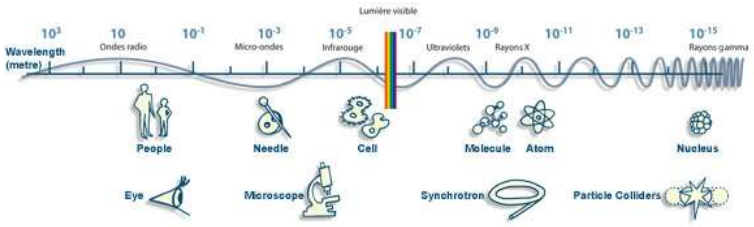


Fig. 2 – Les différents domaines de longueur d'onde

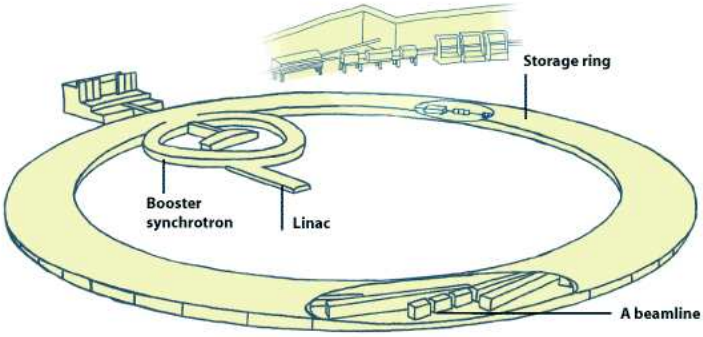


FIG. 3 – Schéma de l'accélérateur

Fonctionnement

Des électrons sont produits par un canon à électrons puis accélérés par un accélérateur linéaire : le Linac. Dans un deuxième temps, ils sont introduits dans un petit anneau : le Booster où ils atteignent une énergie de 6 GeV. Enfin, ils sont injectés dans l'anneau de stockage de circonférence de 844m.

Lors de leur trajet dans l'anneau de stockage, les électrons sont soumis à l'effet de différents types d'aimants. Des aimants de courbures (bending magnet) sont utilisés pour dévier les électrons de leur course rectiligne. C'est cette déviation qui crée le rayonnement X. Il existe également des ondulateurs (undulator) dont le but est d'exciter les électrons pour augmenter l'intensité du faisceau de radiation X. Il existe enfin des aimants de focalisation (focusing magnets) pour concentrer le faisceau avant sa déviation dans une ligne de lumière.

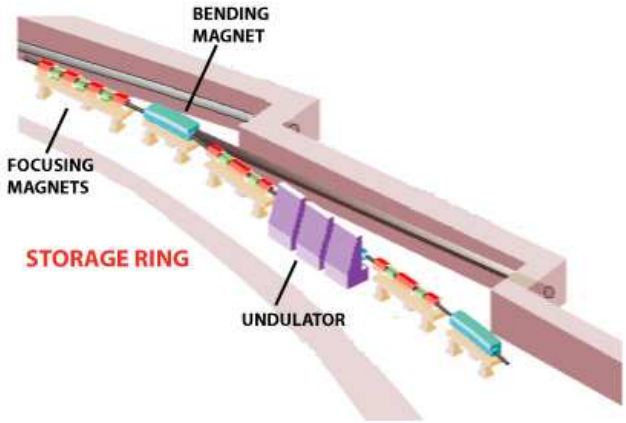


FIG. 4 – Schéma du système de gestion du faisceau

Introduction

Ce manuscrit est le compte rendu de mon Projet de Fin d'Etude (PFE) réalisé au laboratoire du Surface Science Lab (SSL) de l'ESRF de février à juillet 2009.

Deux activités principales guident les travaux du SSL :

- une activité de service qui fournit aux utilisateurs la possibilité de caractériser leurs échantillons au microscope à force atomique et de suivre une formation à l'utilisation des appareils.
- la deuxième activité du SSL est son domaine de recherche propre. Y sont développés de nombreux instruments de microscopie à champ proche le plus souvent destinés à une utilisation sur les lignes de lumière de l'ESRF.

Lors de ce PFE, j'ai pris part au développement de l'un de ces projets : le projet Nano-Pince.

La Nano-Pince se place dans le cadre d'un développement de l'ESRF dans le domaine des nanotechnologies. Trois lignes de lumières voient leurs applications dédiées aux nanosciences. Il est alors nécessaire d'équiper ces lignes d'instruments complémentaires spécifiques aux nanosciences et aux nanotechnologies.

L'exemple le plus emblématique est probablement le Microscope à Force Atomique (AFM). Permettant la caractérisation de surface dans des conditions très variées, il est également l'outil idéal pour les manipulations à l'échelle nanométrique.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le projet de la Nano-Pince mécanique portée par le SSL de l'ESRF. Il s'agit de coupler deux sondes AFM afin de saisir, soulever et maintenir des objets nanométriques au sein du faisceau de rayon X. Le tout contrôlé par une interface simple et intuitive mêlant retour visuel, sonore et haptique pour guider l'utilisateur lors de la nanomanipulation.

L'objectif principal de ce stage est de réaliser une première interface homme/machine réunissant les deux sondes AFM et un transducteur gestuel à retour haptique. Cet objectif implique naturellement de déterminer : *Quelle configuration du montage Nano-Pince autorise un contrôle Temps-Réel des sondes AFM par l'intermédiaire du Transducteur Gestuel Rétroactif ?*

Au début du stage, tous les éléments essentiels du montage étaient enfin réunis au laboratoire : les sondes AFM étaient en cours d'installation (montage des moteurs et installation de l'électronique de contrôle) et le système haptique venait d'être livré. Il était accompagné d'un ordinateur équipé d'une carte DSP comportant des programmes de simulations de réglages et de démonstrations du système. Il n'avait encore jamais été couplé à un instrument extérieur.

La réalisation de l'objectif principal a impliqué la réalisation d'objectifs secondaires :

- prise en main des techniques AFM, notamment l'AFM à diapason développé au SSL ;
- prise en main du Transducteur Gestuel Rétroactif (TGR) et rédaction d'un mode d'emploi pour les futurs utilisateurs du laboratoire ;
- réalisation de simulations propres au montage Nano-pince.

Le compte rendu de ce stage est divisé en 3 parties.

Le chapitre 1 présente quelques rappels importants sur la microscopie à force atomique et introduit l'AFM à diapason développé au SSL. Ce procédé permet l'intégration de l'AFM sur les lignes de lumière de l'ESRF. Il est commercialisé sous le nom d'X-AFM®. La dernière partie de ce chapitre présente le montage Nano-Pince.

Le chapitre 2 est une description du transducteur gestuel rétroactif ERGOS utilisé pour le montage Nano-Pince : performances mécaniques, présentation de l'électronique de contrôle, programmes de simulation déjà existants.

Le troisième et dernier chapitre présente le travail effectué tout au long du stage pour la réalisation de l'interface réunissant les systèmes décrits dans les chapitres 1 & 2.

Chapitre 1

Nano-Pince : de la Microscopie à Force Atomique à la Nano Manipulation 3D

Comme cela a été présenté en introduction, la Nano-Pince souhaite se positionner dans la catégorie des nanomanipulateurs à AFM. L'idée est de coupler deux sondes AFM pour permettre la manipulation en 3 dimensions d'objets nanométriques. Sans oublier que cet instrument sera intégré aux lignes de lumière de l'ESRF, ce qui impose un grand nombre de contraintes supplémentaires.

Pour développer cette Nano-Pince, le SSL s'appuie sur une expérience acquise depuis plusieurs années en AFM et en instrumentation appliquée à l'échelle nanométrique et plus particulièrement sur le développement de l'X-AFM®.

L'X-AFM® est un AFM développé au sein du SSL lors d'un projet européen (X-Tip 2004-07) qui est spécialement conçu pour une utilisation sur les lignes de lumière. Sa spécificité est d'utiliser des pointes de tungstène fixées sur un diapason et non sur un cantilever classique. La Nano-Pince utilisera le même procédé pour permettre l'intégration sur les lignes de lumière.

Le présent chapitre expose donc quelques rappels importants sur la microscopie à force atomique puis décrit en détails l'X-AFM®, pour enfin introduire le montage Nano-Pince.

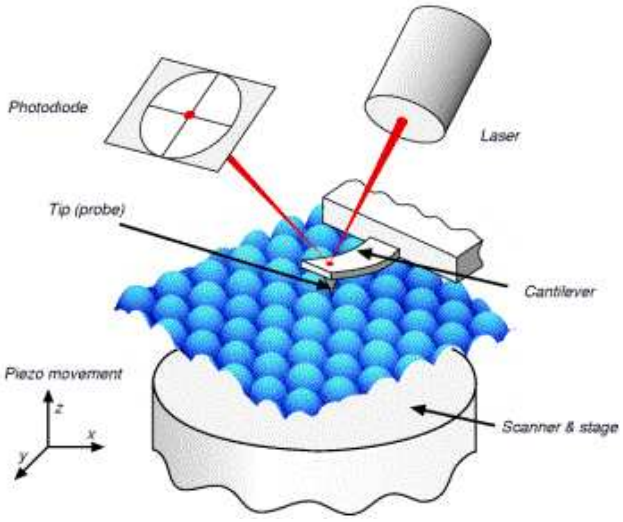


FIG. 1.1 – Illustration schématique d'un AFM

1.1 Microscopie à Force Atomique

Pour les travaux dans le domaine des nanosciences, il est nécessaire d'utiliser des outils d'observation adaptés à l'échelle étudiée. En effet, d'après le critère de Rayleigh, les outils de la microscopie optique deviennent insuffisants pour observer des objets dont la taille est inférieure à la longueur d'onde de la lumière. C'est pourquoi, d'autres techniques ont vu le jour pour observer à l'échelle atomique, comme par exemple la microscopie à champ proche. Le Microscope à Force Atomique (AFM) appartient à cette catégorie.

1.1.1 Principe de la Microscopie à Force Atomique

Un microscope à Force Atomique est constitué d'une pointe, fixée à l'extrémité libre d'un levier (cantilever). Lorsque la pointe est suffisamment proche de la surface, des interactions entre la pointe et la surface apparaissent. Ces interactions induisent une déformation du levier, cette dernière est alors mesurée à l'aide de la réflexion d'un laser sur la face libre du levier détectée par un photodétecteur. Pour former l'image de toute la surface, on effectue ensuite un balayage, mesurant les déformations sur toute la surface échantillonnée (cf figure 1.1).

La Microscopie à Force Atomique est la technique de microscopie à champ proche la plus répandue dans le monde scientifique grâce à sa simplicité d'exécution. En effet, il est possible d'imager des surfaces conductrices ou isolantes, dans l'air, le vide ou en milieu liquide, sans aucune préparation ou traitement de l'échantillon.

1.1.2 Nature des Forces à l'échelle nanométrique

Lorsque la sonde AFM cartographie la surface d'un matériau, la pointe est soumise à des interactions dont la portée et l'origine sont diverses. Elles se résument par l'équation suivante :

$$\vec{F} = \vec{F}_{LJ} + \vec{F}_{cap} + \vec{F}_{E/M} + \vec{F}_B \tag{1.1}$$

Où $\vec{F}_{LJ}$ représente la force de Lennard Jones, $\vec{F}_{cap}$ la force de capillarité, $\vec{F}_{E/M}$ les forces électrostatiques et magnétiques et $\vec{F}_B$ la force d'origine chimique. Les caractéristiques des forces sont :

1. **Force de Lennard Jones**
   Elle se compose d'une force répulsive à courte portée liée au principe d'exclusion de Pauli, lors de l'interprénétration des cortèges électroniques et d'une force attractive à plus longue portée (Van der Waals). Son expression est :
   $$F_{LJ} = \frac{\alpha}{r^{13}} - \frac{\beta}{r^7} \tag{1.2}$$
   α et β dépendent des matériaux et de l'environnement.
2. **Force de Capilarité**
   C'est une force attractive à courte portée qui est causée par la présence d'une fine couche d'eau sur l'échantillon et sur la pointe lorsque les expérience sont menées à l'air.
3. **Force Electrostatique et Magnétique**
   La force électrostatique est due à la présence de charges électriques sur l'échantillon et sur la pointe. La force magnétique est une interaction de type dipôle magnétique-dipôle magnétique. Ce sont des forces à longues portées.
4. **Force Chimique**
   Cette force n'est présente que sous vide. Des liaisons dites pendantes restent sur la pointe ou sur la surface et peuvent réagir chimiquement lors du contact.

Toutes ces forces sont décrites plus en détails en Annexe B.1.

1.1.3 Les modes opératoires

Un microscope à force atomique opère suivant trois régimes de fonctionnement principaux, à savoir le **mode contact**, le **mode non contact** et le **mode contact intermittent**.

Le mode contact

Dans le mode contact, la pointe entre physiquement en contact avec la surface et sonde les forces de répulsion de courtes portées (mode répulsif). La distance de travail pointe surface est donc faible : $d \leq 0.3nm$ et le domaine de force est $10^{-9}N \leq F_{contact} \leq 10^{-7}N$.

La force de contact entre la pointe et la surface est déterminée par la mesure de la déflexion du levier. Pour une déformation δz d'un levier de raideur k, la force exercée est $F_{contact} = k * \delta z$. La technique la plus couramment utilisée (AFM commerciaux) pour mesurer la déflexion du levier est l'exploitation d'une réflexion optique d'un faisceau laser sur la face supérieure du levier. Toute déformation du levier produit alors un déplacement du faisceau réfléchi, ce déplacement est enregistré via un photodétecteur de position à cadrans (Position Sensitive Detector PSD).

Pour imager l'échantillon, il existe 2 techniques possibles :

1. la technique dite à hauteur constante, c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'asservissement de la position en z de l'échantillon. Lors du balayage, les reliefs modifient l'intensité de la force (attraction dans un trou ; répulsion sur une bosse) ce qui déforme le levier. On mémorise cette déformation pour chaque position du balayage afin de former l'image.
2. la technique dite de l'isoforce. Dans ce cas, la boucle d'asservissement est active sur une déflexion de consigne δz. La hauteur de l'échantillon varie de telle sorte que la déflexion du levier reste égale à la déflexion de consigne. On mémorise ici la hauteur de l'échantillon pour chaque position du balayage afin de former l'image de la surface.

La résolution topographique verticale est couramment de $\Delta r_z = 0,01nm$, et horizontalement de $\Delta r_x = 1nm$.

Le mode non contact ou dynamic mode

Dans le mode non contact, l'interaction pointe surface est très faible (pas de contact physique au sens classique). La pointe sonde les forces attractives de longues portées. La distance de travail pointe surface est donc supérieure que précédemment, $d \geq 0,3nm$ et le domaine des forces est inférieur, $10^{-15}N \leq F_{contact} \leq 10^{-10}N$.

Etant donné le domaine de forces, plus faible pour ce mode opératoire, la détection directe des forces est difficile. On modélise ici le levier par un système {ressort + masse} dont on force l'oscillation au voisinage de sa fréquence de résonance ω_0. Le levier se comporte alors comme un oscillateur harmonique à 1 dimension.

$$m\ddot{z} + \gamma\dot{z} + kz = A_e k \cos\omega t \tag{1.3}$$

On utilise ensuite le fait que la constante de raideur k du système varie en fonction de l'interaction entre la pointe et la surface. Un oscillateur est positionné très près de la surface jusqu'à ce que les forces agissent sur la masse de l'oscillateur. Les variations de phase, d'amplitude ou de fréquence de l'oscillateur dépendent alors directement du gradient de la force entre la pointe et la surface [voir l'annexe A].

Le mode contact intermittent ou Tapping Mode

Le mode contact intermittent ou Tapping mode constitue un compromis entre les modes contact et non contact. Le principe de ce mode est sensiblement le même que pour le dynamic mode puisqu'il s'agit toujours d'un système soumis à une oscillation forcée de haute fréquence. La différence vient du fait que l'amplitude de l'oscillation est ajustée de telle sorte qu'en position basse, un contact physique intermittent ait lieu entre la pointe et la surface. On ne se limite donc plus à sonder les forces attractives à longues portées mais on se place dans le domaine des forces répulsives à courtes portées.

Les caractéristiques de ce mode sont :
- une force normale réduite ($F_z \leq 10^{-9}N$),
- pas de forces latérales de friction,
- une résolution identique au mode contact.

Ce mode est idéal pour imager les matières molles car il ne détériore pas l'échantillon. C'est le mode le plus couramment utilisé en imagerie AFM.

1.2 Présentation de l'X-AFM®

Le Microscope à Force Atomique décrit ci-dessus présente cependant des limites importantes aux yeux de certains utilisateurs de l'ESRF, notamment pour son intégration sur les lignes de lumière.

L'ESRF souhaite en effet développer ces activités dans le domaine des nanosciences. Trois lignes de lumière seront tournées vers cet objectif et spécialisées dans les nanotechnologies. Être capable d'intégrer un Microscope à Force Atomique sur une ligne de lumière, et donc, être capable d'observer un échantillon par AFM et par rayon X simultanément, est un atout considérable pour l'étude des propriétés nanoscopiques de la matière.

Le principal inconvénient d'un AFM classique est la complexité du système de mesure de la déformation du cantilever {laser + photodétecteur}. Le Surface Science Laboratory de l' ESRF a donc développé un nouveau type d'AFM utilisant un diapason pour remplacer l'usuel cantilever. Ce projet a représenté le travail de thèse de Mario Rodrigues au sein du SSL [19].

L'X-AFM® est un produit commercialisé par la société Small Infinity issue de l'ESRF.

1.2.1 Théorie du diapason

Généralités

Les diapasons utilisés pour l'X-AFM® sont les mêmes que ceux utilisés dans les montres. Les 2 bras du diapason sont fixés dans un socle commun, les vibrations sont donc symétriques. Les caractéristiques des bras sont données sur le schéma de la figure 1.2.

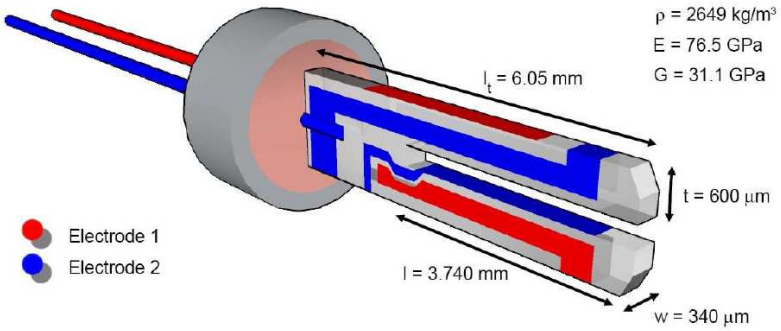


Fig. 1.2 – Schéma et propriétés du diapason [19]

Les électrodes, en quartz, possèdent des propriétés piézoélectriques. Ces contacts électriques permettent soit d'exciter le diapason électriquement soit de lire l'amplitude des vibrations du diapson sur certaines directions.

Comportement dynamique du diapason

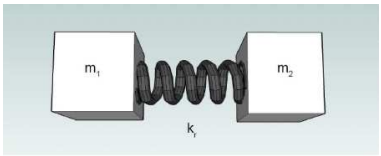


Fig. 1.3 – Oscillateurs couplés

Cette partie présente quelques résultats issus de la thèse de Mario Rodrigues [19] sur le comportement dynamique du diapason qui nous sont nécessaires pour une bonne compréhension du montage Nano-Pince.

Le diapason peut être modélisé par un oscillateur harmonique dont les propriétés s'expriment en fonction des caractéristiques du diapason. La masse réduite s'exprime en fonction des masses m_1 et m_2 de chaque bras :

$$m_r = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \tag{1.4}$$

La constante de raideur effective s'exprime en fonction des raideurs k_1 et k_2 de chaque bras ainsi que la raideur de couplage k_c [1] qui relie les deux fourches :

$$k_r = \frac{k_1 k_c k_2}{k_1 k_c + k_2 k_c + k_1 k_2} \tag{1.5}$$

Et de la même façon, on calcule le coefficient d'amortissement effectif du système :

$$\gamma_r = \frac{\gamma_1 \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2} \tag{1.6}$$

Ce qui nous permet d'écrire l'équation réduite du mouvement :

$$m_r \ddot{x_r} + \gamma_r \dot{x_r} + k_r x_r = F_r \tag{1.7}$$

où F_r, m_r, k_r et γ_r sont respectivemment la force effective, la masse réduite, la constante de raideur effective et le coefficient d'amortissement. On retrouve ainsi l'équation du mouvement du mode non contact pour un cantilever classique (cf annexe A).

Ce système possède alors sa fréquence de résonance propre (voir figure 1.4) :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_r}{m_r}} \tag{1.8}$$

ainsi que la largeur de la réponse Lorentzian du système :

$$\Delta\omega = \frac{\gamma_r}{m_r} \tag{1.9}$$

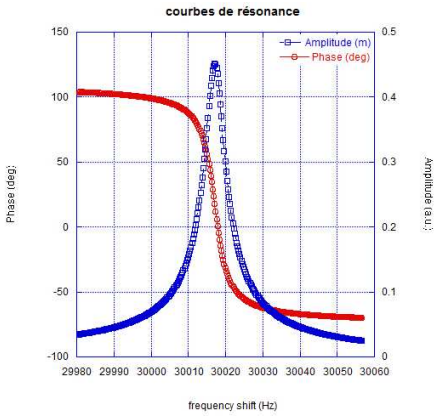


FIG. 1.4 – Courbe de résonance d'un diapason excité mécaniquement. Le courant est mesuré à la sortie d'un amplificateur courant/tension. Largeur à mi-hauteur de 10Hz pour une fréquence de résonance à 30kHz.

Tout comme dans le mode non contact en AFM classique, cette fréquence de résonance varie lorsque le diapason interagit avec le monde extérieur, en pratique avec la surface de l'échantillon étudié (cf figure 1.5). La constante de raideur est alors égale à :

[1] k_c dépend du mode de résonance sollicité lors de l'excitation. Un diapason possède en effet un grand nombre de modes de résonance, c'est-à-dire plusieurs mouvements relatifs possibles entre les 2 bras

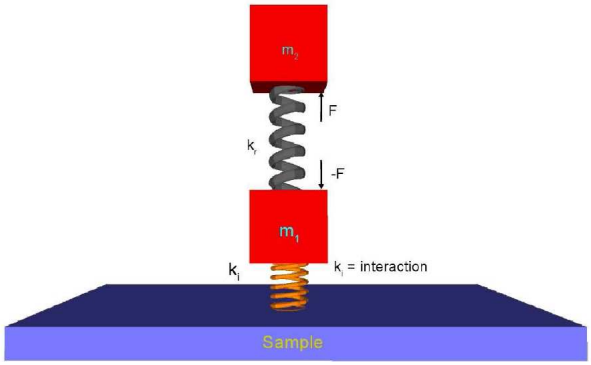


FIG. 1.5 – Interaction du diapason avec la surface d'un échantillon

$$k_{eff} = k_r + \epsilon k_i \tag{1.10}$$

où k_i est la constante de raideur de l'interaction pointe-surface, c'est-à-dire le gradient de la force $\frac{\partial}{\partial z}F_{p-s}$ de l'interaction. ϵ est un coefficient de symétrie du diapason : $\epsilon = m_2/(m_1 + m_2)$. Dans notre cas, il est approximativement égal à $\epsilon = 0.22$ [19].

La masse réduite elle, ne varie pas en présence ou non d'interactions. Ainsi le système présentera une résonance à la fréquence :

$$\omega_i = \sqrt{\frac{k_{eff}}{m_r}} \tag{1.11}$$

On en déduit facilement la formule de cette variation de fréquence en fonction du gradient de la force :

$$\partial\omega = -\frac{\epsilon\omega_0}{2k_r}\frac{\partial F_{p-s}}{\partial z} \tag{1.12}$$

La plus petite variation de fréquence détectable est de 0,1Hz pour notre montage [19] pour un diapason opérant dans l'air, ce qui correspond à un gradient de force de $k_i = \frac{2k_r}{\epsilon\omega_0}\partial\omega = \frac{2*10000}{0.22*32500}0.1 = 0.3nN/nm$ [18].

Rôle du facteur de qualité

On définit le facteur de qualité Q :

$$Q = \frac{\omega}{\Delta\omega} \tag{1.13}$$

Ce facteur de qualité est le secret de la réussite de l'utilisation du diapason en imagerie AFM. En effet, il est très élevé, bien plus élevé que pour un cantilever d'AFM en Si (de l'ordre de 5000 pour un diapason contre quelques centaines pour un cantilever dans l'air). Il permet donc de mesurer des variations plus faibles de la phase, ce qui offre une plus grande sensibilité. En effet, la phase dépend directement de Q :

$$\partial\phi = \frac{\pi Q}{4k_r}k_i \tag{1.14}$$

On remarque que la phase dépend également de la constante de raideur k_r du diapason. On définit une constante de *raideur dynamique* du système $k_d = k_r/Q$.

Excitation du diapason

Il existe 4 manières d'exciter un diapason :

1. Il peut être excité électriquement grâce aux propriétés piézoélectrique des électrodes (cf section 1.2.1) ;
2. Il peut être excité mécaniquement par une source extérieure ;
3. Ou bien de façon accoustique (impossible dans des conditions de vide) ;

4. Ou finalement de manière électromagnétique.

Nous utiliserons toujours la 2ème technique dans la suite de ce rapport : excitation mécanique. C'est la méthode la plus simple à mettre en oeuvre et qui est utilisable pour tous les types d'échantillons.

1.2.2 Le diapason au coeur de l'X-AFM et de la Nano-Pince

Cette partie présente maintenant le montage AFM, intégrant un diapason, utilisé tout au long de ce stage.

Le diapason se positionne au centre de la tête AFM (cf figure 1.6). Une pointe, généralement en tungstène, dont le diamètre à l'extrémité est inférieur à 100nm, est collée sur l'un des bras (cf annexe C). Le diapason est excité mécaniquement à l'aide d'un élément piézoélectrique fixé sur le support du diapason.

Du fait de la symétrie des électrodes sur chaque bras, les déformations de ces derniers créent un courant alternatif proportionnel à l'oscillation du diapason :

$$I(t) = A(\omega) * \cos\left(\omega t + \phi(\omega)\right) \tag{1.15}$$

Ce signal, de quelques nA, est ensuite converti en tension par l'intermédiaire d'un montage AO *amplificateur & convertisseur courant-tension* :

$$V(t) = -RI(t) \tag{1.16}$$

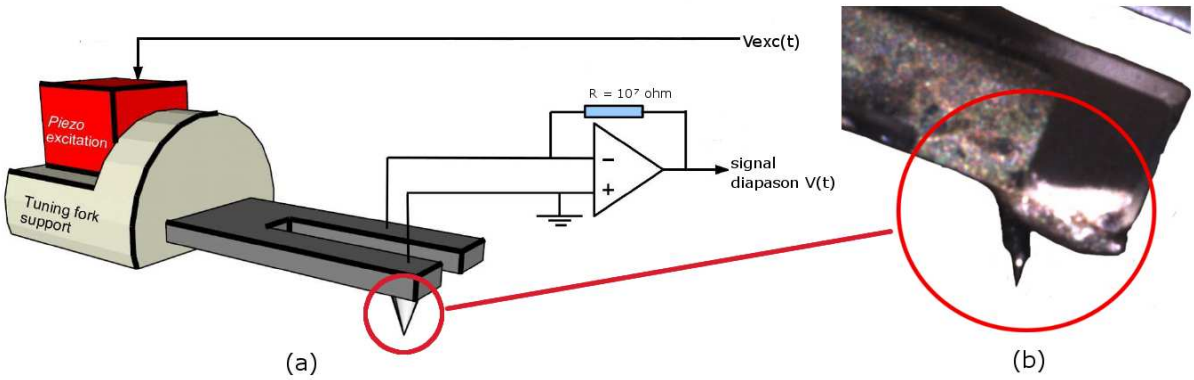


FIG. 1.6 – Montage de la tête AFM (a) le diapason est fixé sur son support. Ce dernier est excité par un élément piézoélectrique. Le signal du diapason est amplifié par un montage AO ($R = 10^7\Omega$). (b) Pointe en tungstène collée sur un bras du diapason, diamètre du fil de tungstène : $100\mu m$, rayon de courbure à l'extrémité de la pointe : 100nm.

La motorisation de la tête se fait grâce à deux types de moteurs, des moteurs inertiels pas-à-pas pour les déplacements larges et un scanner piézoélectrique pour les déplacements fins.

1.2.3 Fonctionnement de l'électronique de contrôle

L'électronique de contrôle utilisée pour le montage X-AFM® et pour le montage Nano-Pince est l'électronique commerciale *Nanonis*. Son application est dédiée à toutes les formes de microscopie à champ proche.

Elle se compose de deux modules principaux :

1. le module *Control System base* constitué d'un OS Temps-Réel et d'une carte d'acquisition FPGA de NATIONAL INSTRUMENTS. L'OS Temps-Réel est connecté via une communication TCP/IP à l'ordinateur Hôte depuis lequel l'utilisateur peut lancer le logiciel de commande Nanonis. Ce module réalise un grand nombre de fonctions pour le contrôle de la position de la pointe AFM comme par exemple effectuer une approche retrait, scanner une ligne 1D ou une image 2D, etc. C'est dans ce module que se trouve le contrôleur Proportionnel-Intégral permettant d'asservir la hauteur Z_{ech} de l'échantillon lors de la formation d'une image.

2. le module *Oscillation Controller* (OC4) qui a pour fonction l'analyse des réponses d'un oscillateur pour la mesure de phénomènes physiques. Sa tâche est donc d'exciter et d'analyser le signal retour du cantilever ou du diapason dans notre cas. Ce module mesure alors la variation d'amplitude, de phase ou même de fréquence (grâce à l'utilisation d'une PLL, voir ci-aprés) de l'oscillateur, ces variations étant proportionnelles au grandient de force de l'interaction pointe-surface. Ces variables permettent alors l'asservissement de la hauteur Z_{ech} de l'échantillon (voir annexe A).

Le module OC4

Il se compose d'une carte d'acquisition FPGA National Instruments (cf figure 1.7). Une des sorties analogiques (nommée *Output*) de la carte génère le signal d'excitation $Vexc(t)$ de l'oscillateur et une entrée analogique (nommée *Input*) acquiert le signal retour $V(t)$ du diapason (après amplification et conversion courant/tension). D'autres sorties analogiques permettent de lire les signaux calculés par le FPGA comme le signal d'amplitude, de phase ou encore de fréquence.

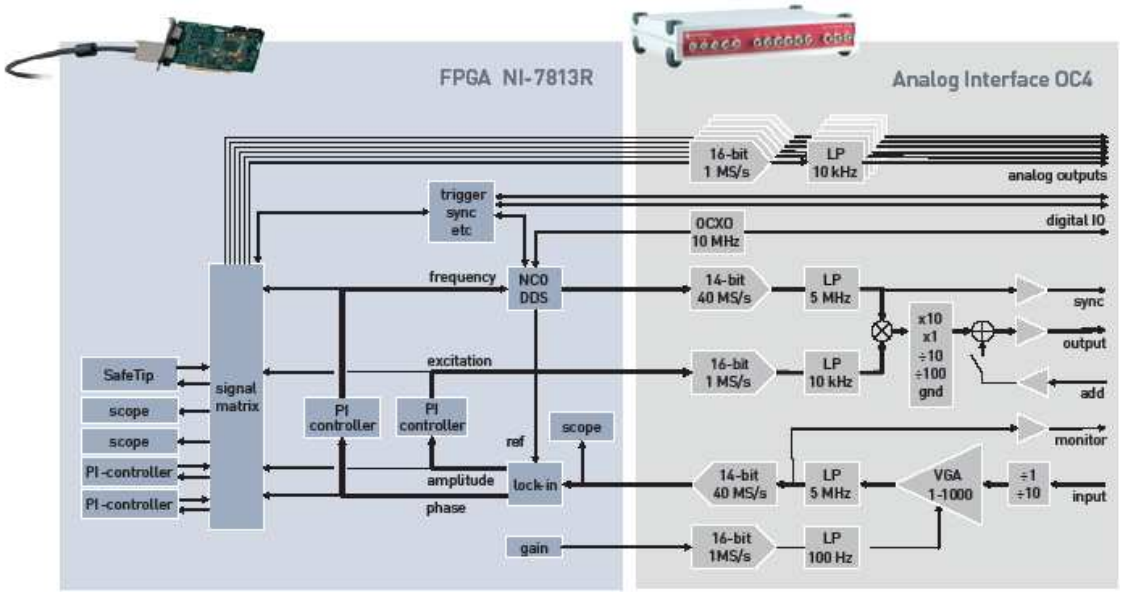


Fig. 1.7 – Schéma du module OC4 de l'électronique Nanonis (extrait du datasheet)

La carte FPGA réalise les fonctions suivantes :

Le comparateur de phase Le comparateur de phase, qui se trouve implicitement dans la fonction Lock-in du schéma 1.7, est un système très couramment utilisé dans de nombreuses applications telles que les télécommunications, les sytèmes d'asservissement mécanique ou bien pour la démodulation.

Il est constitué d'un *mélangeur* suivi d'un filtre passe bas. Le mélangeur est le plus souvent un multiplieur calculant le produit entre un signal de mesure $x_i(t)$ et un signal de référence $x_r(t)$. Si nous considérons deux signaux sinusoïdaux, le produit est de la forme suivante :

$$x_{ir} = A_i A_r \sin(\omega_i t + \phi_i) \sin(\omega_r t + \phi_r) \tag{1.17}$$

qui devient, par l'intermédiaire d'identités trigonométriques :

$$x_{ir} = \frac{A_i A_r}{2} \left[\cos((\omega_i - \omega_r) t + \phi_i - \phi_r) - \cos((\omega_i + \omega_r) t + \phi_i + \phi_r)\right] \tag{1.18}$$

Le filtre passe-bas supprime la seconde composante, nous laissant le signal :

$$x_{ir} = \frac{A_i A_r}{2} \cos((\omega_i - \omega_r) t + \phi_i - \phi_r) \tag{1.19}$$

Lock-in (Amplifier) Un Lock-in amplifier simple a la même fonction que le comparateur de phase avec pour entrées, le signal de référence et le signal à mesurer. Dans notre cas, le signal de référence est le signal d'excitation, et le signal à mesurer, le signal provenant du diapason. Le signal du diapason possèdant la même fréquence que l'excitation, la sortie du comparateur de phase est de la forme :

$$x_{o1} = \frac{A_i A_r}{2} \cos\left(\phi_i - \phi_r\right) \tag{1.20}$$

Le Lock-in peut comporter une deuxième voie, effectuant le même calcul mais pour le signal de référence décalé de $\pi/2$, donnant la réponse suivante :

$$x_{o2} = \frac{A_i A_r}{2} \sin\left(\phi_i - \phi_r\right) \tag{1.21}$$

Avec cette seconde voie, il est possible de calculer l'amplitude et la différence de phase du signal étudié :

$$X_o = \sqrt{x_{o1}^2 + x_{o2}^2} = \frac{A_i A_r}{2} \tag{1.22}$$

$$\phi_o = \arctan \frac{x_{o1}}{x_{o2}} = \phi_i - \phi_r \tag{1.23}$$

Les contrôleurs Proportionnel-Intégral Le module OC4 utilise deux contrôleurs PI pour asservir l'amplitude et le déphasage de l'excitation du diapason. Leur fonction de transfert avec la transformée de Laplace est (figure 1.8) :

$$C(s) = \frac{1 + KT_i s}{T_i s} = \frac{1 + T_n s}{T_i s} \tag{1.24}$$

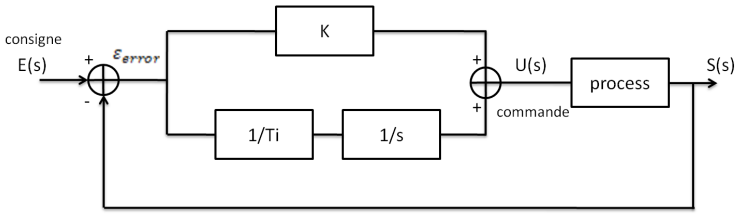


FIG. 1.8 – Schéma bloc du contrôleur proportionnel-intégral (architecture parallèle)

Oscillateur Contrôlé par entrée digitale - NCO DDS L'oscillateur contrôlé (NCO) permet de générer un signal périodique dont la fréquence dépend du signal d'entrée, ici un signal numérique. Ce système est très souvent couplé avec une PLL (voir le paragraphe suivant).

Phase Locked Loop - PLL Une boucle à verrouillage de phase (ou phase locked loop en anglais) est un montage électronique permettant de générer un signal dont la différence de phase avec un signal de 'référence' est fixe.

Ce signal de référence est pour nous le signal du diapason, le signal généré est le signal d'excitation du piézo excitateur. La PLL se compose de tous les éléments précédemment cités, comme l'illustre la figure 1.9.

Le comparateur de phase nous fournit le déphasage entre le signal provenant du NCO, utilisé pour l'excitation du diapason, et la réponse de ce dernier. Nous choisissons un déphasage de consigne à appliquer entre les signaux. Lorsque la pointe interagit avec la surface, la fréquence propre du diapason est modifiée, et le déphasage avec l'excitation également. Le PI impose alors au NCO de modifier la fréquence d'excitation pour maintenir le déphasage égal à la consigne.

La gradient de la force d'interaction n'est alors plus proportionnel à la variation de phase restée fixe, mais à la variation de fréquence (pour un modèle de PLL linéaire). Ce système permet, tout particulièrement, de

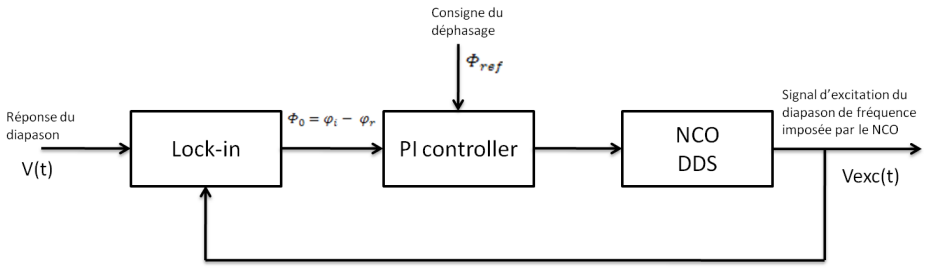


FIG. 1.9 – Schéma bloc du montage de la PLL

supprimer le domaine de saturation que l'on observe en mesurant la variation de phase seule. En effet, la phase ne possède un comportement linéaire qu'au voisinage de la fréquence de résonance. Ce domaine est d'autant plus étroit que le facteur de qualité est grand, ce qui est le cas pour le diapason.

Nous avons utilisé cette contre réaction tout au long de ce travail et ainsi mesuré la variation de fréquence du diapason proportionnelle au gradient de la force d'interaction pointe-surface.

1.3 Un pas vers la Nano Manipulation

La microscopie à force atomique n'est pas uniquement un moyen d'observer le nano-monde mais également un moyen d'agir sur lui. En effet, les interactions pointe-échantillon peuvent servir à modifier les propriétés locales de la surface, voire de déplacer des objets sur cette surface.

L'X-AFM® est ici un outil privilégié dans ce domaine. La possibilité de « voir » l'échantillon grâce aux rayons X lorsqu'on le manipule permet de déduire un grand nombre de propriétés de cet échantillon.

Un permier pas vers la nano manipulation a déjà été réalisé grâce à l'X-AFM®. Des expériences ont été réalisées lors de la thèse de Mario Rodrigues pour déterminer la variation du paramètre de maille lors de l'indentation d'un plot de SiGe par la pointe AFM et donc d'accéder à la mesure du module d'Young d'un nano-objet précis [20].

Alors pourquoi ne pas faire le deuxième pas ?

C'est l'idée qui guide le projet Nano-Pince du SSL. L'objectif est d'obtenir un nano manipulateur offrant de nombreuses possibilités de déplacement, il faut pouvoir pousser ou tirer des nano-objets (manipulation 1D ou 2D) mais également les soulever de l'échantillon et les maintenir en l'air, puis les reposer (manipulation 3D). Il faut également pouvoir contrôler les forces exercées sur ces objets pour ne pas les détériorer lors de la manipulation ou pour le soumettre à des contraintes variables.

1.3.1 L'état de l'art

Avant d'évoquer les objectifs précis de la Nano-Pince, nous pouvons parler des progrés qu'a connu le domaine de la nano manipulation depuis ses débuts [10].

L'exploration de l'infiniment petit connaît un essor dans les années 80 grâce à la découverte du microscope à effet tunnel puis celle du microscope à force atomique par Binnig, Quate et Gerber. La précision de ces outils n'a jamais cessé de s'améliorer, jusqu'à permettre aux scientifiques de manipuler les atomes un par un. La conception, la fabrication et la manipulation d'objets et de matériaux de dimensions nanométriques devenaient alors possible.

Mais pourquoi s'évertuer à aller voir toujours plus loin dans la matière ?

La réponse est évidente pour Jean-Yves MARZIN [17], physicien et directeur du laboratoire de photonique et de nanostructures du CNRS à Marcoussis, qui nous dit que c'est « incontestablement pour la quantité de propriétés nouvelles que révèle la matière à cette échelle et que ne possèdent pas les objets les plus grands ». En d'autres mots, les propriétés des matériaux –optique, mécanique, magnétique, thermique, conductivité–

dépendent beaucoup de la taille. Les enjeux sont donc multiples, d'une part comprendre comment la matière est structurée à petite échelle, et d'autre part contrôler ses propriétés pour la conception de nouveaux composants, circuits, voire systèmes.

Les nanomanipulations sont aujourd'hui très nombreuses et variées. Impossible donc de tout référencer. Mais nous pouvons présenter quelques expériences types de manipulations par AFM :

1. La technique la plus simple consiste à pousser une particule sur une surface grâce à la pointe de l'AFM en mode contact (push and pull fig.1.10 (a)) [13].
2. L'évolution de cette technique est d'utiliser des forces électrostatiques pour « coller »la particule à la pointe (electric field trapping fig.1.10 (b)) et ainsi pouvoir la soulever afin de former des assemblages en 3 dimensions. Cette technique ne permet cependant pas de contrôler et de choisir précisemment les interactions pointe-objet.
3. Pour clore cette série d'exemples, nous pouvons citer le dernier type de nanomanipulateur. C'est d'ailleurs dans cette catégorie que souhaite se positionner la Nano-Pince. Ce type de nanomanipulateur utilise deux AFM pour saisir les objets entre les deux pointes (pick-and-place nanomanipulation fig.1.10 (c)). Un nanomanipulateur de ce type est développé à l'université Pierre et Marie Curie de Paris et a ainsi permis de réaliser un assemblage de deux nanotubes de carbone en soulevant le premier pour le poser sur le second [23].

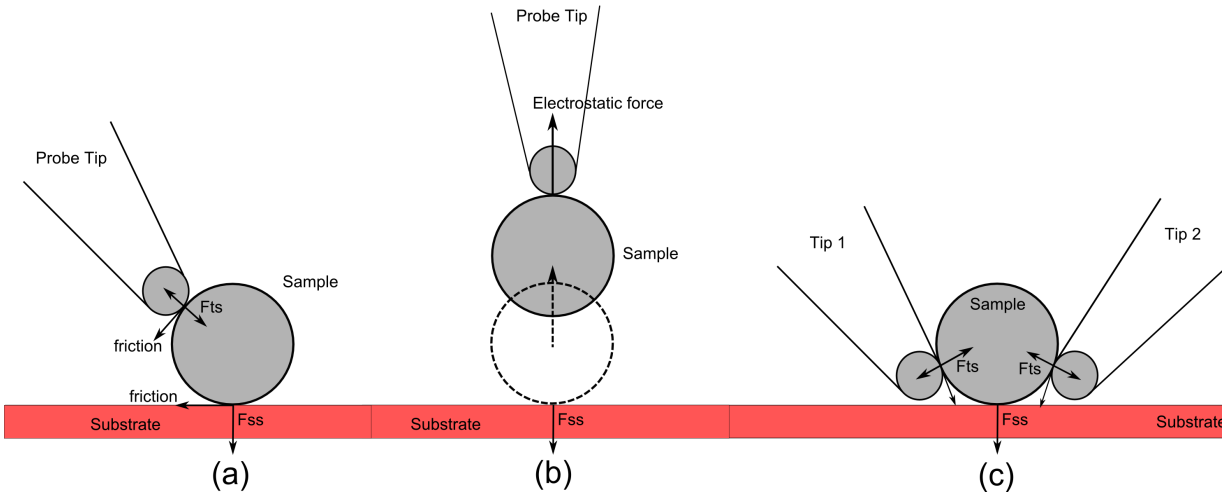


FIG. 1.10 – Exemples de nanomanipulation : (a) push and pull manipulation ; (b) electric field trapping ; (c) pick-and-place nanomanipulation grâce à deux pointes AFM.

1.3.2 Les objectifs de la Nano-Pince

La réalisation du manipulateur Nano-Pince se place dans le cadre d'un développement de l'ESRF vers les nanotechnologies. Trois lignes voient leurs applications dédiées aux nanosciences et sont déjà équipées de l'X-AFM. Les objectifs de la Nano-Pince peuvent se diviser en deux aspects.

Le premier représente les objectifs physiques de la manipulation. Comme cela a été mentionné précédemment, la Nano-Pince doit saisir des objets par l'intermédiaire de deux pointes AFM. La taille attendue des objets manipulés varie de $10\mu m$ à $100nm$ environ. Pour des objets plus petits, la manipulation devient plus complexe (taille de l'objet inférieure à la taille de la pointe). Cette taille doit correspondre au diamètre du faisceau de rayons X. Grâce aux progrés effectués sur la focalisation, le diamètre minimal possible du rayon est pour l'heure actuelle de $100nm$ et devrait pouvoir atteindre les $10nm$.

Les propriétés mécaniques de ces objets sont également variées. La gamme de module d'Young des différents objets observés est très étendue : les matériaux étudiés allant du latex à des échantillons biologiques

comme des cellules vivantes. Il faut donc déterminer la sensibilité en force du montage diapason pour manipuler sans détériorer.

Il y a enfin toutes les contraintes liées à l'intégration de la Nano-Pince sur les lignes de lumières (encombrement stérique, alignement du faisceau et de l'objet, etc.).

Le deuxième aspect des objectifs est lié à l'interface. La manipulation doit être simple et intuitive. Le souhait est de créer une interface mêlant retour haptique, visuel et sonore.

Le retour haptique est permis grâce à l'utilisation d'un Transducteur Gestuel Rétroactif (TGR). Il réalise le pilotage 3D des moteurs des deux pointes AFM et renseigne l 'utilisateur en temps-réel sur les interactions mesurées grâce à un retour de force.

1.3.3 Le montage mécanique de la Nano-Pince

Le montage AFM de la Nano-Pince est très similaire à celui de l'X-AFM® présenté précédemment. C'est en réalité une combinaison de deux X-AFM®. La figure 1.11 présente le montage initial. Ce montage a connu quelques évolutions depuis et sera encore modifié afin de trouver sa configuration idéale. Cependant le principe reste toujours le même. Les diapasons sont fixés sur des supports excités mécaniquement par des piézos excitateurs. Chaque support est lui même fixé sur un assemblage de moteurs. Tout comme pour l'X-AFM®, deux types de moteurs sont utilisés :

1. des moteurs inertiels ; ces moteurs utilisent l'extension ou la contraction très rapide d'un élément piézoélectrique créant des forces de frottement entre ce piézo et la masse à déplacer. Ces forces entraînent alors le plateau par petits pas ($30nm$ pour les moteurs utilisés). L'amplitude totale du mouvement est de quelques millimètres dans chacune des directions,
2. un scanner piézoélectrique XYZ ; ce moteur se compose de 3 éléments piézoélectriques indépendants permettant un mouvement reproductible de résolution atomique. L'amplitude du mouvement est de $38\mu m$ dans chaque direction pour le scanner utilisé lors de ce travail.

Il faut également adapter l'électronique au montage Nano-Pince. Comme il y a désormais deux diapasons, il faut ajouter un module OC4. Mais il est impossible d'ajouter un module *Control System* permettant l'asservissement de la pointe. La deuxième pointe ne sera donc pas capable d'imager les échantillons, ce qui n'est pas essentiel.

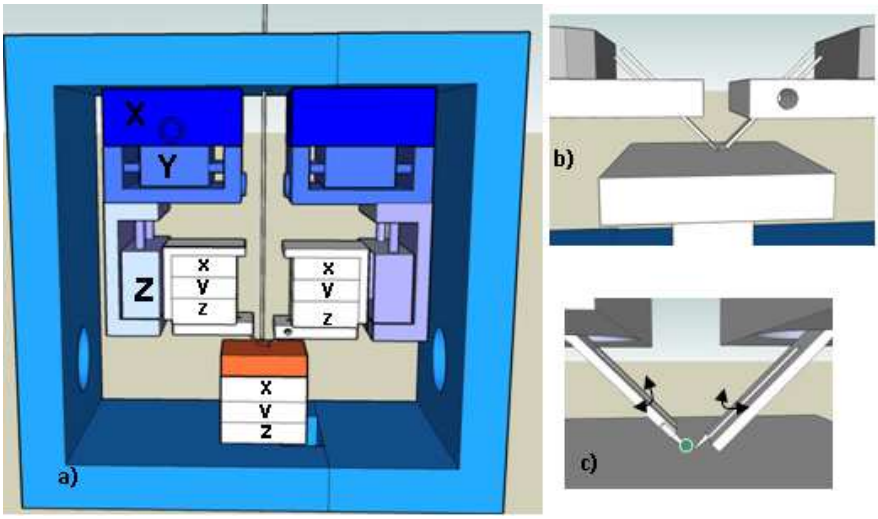


FIG. 1.11 – (a) Tête de la Nano-Pince basée sur la combinaison de deux tours indépendantes à deux étages chacune, un étage pour grands déplacements et un étage pour petits déplacements ; (b) zoom sur les supports diapasons ; (c) zoom sur l'arrangement spatial des sondes l'une par rapport à l'autre.

Pour compléter l'interface de la Nano-Pince, nous utilisons un système de contrôle à retour de force. Ce système haptique, qui est présenté dans le chapitre 2, doit permettre le contrôle des moteurs de la tête

et également le renvoi d'un retour sensoriel à l'utilisateur, le renseignant sur l'interaction pointe-surface en temps réel. Ce système est piloté par une carte DSP qui analyse et génère respectivement les signaux de positions et de forces du joystick.

La figure 1.12 résume tous les éléments du montage Nano-Pince. Les interconnexions entre ces différents éléments sont ici très simplifiées et même incomplètes, il ne s'agit que d'une représentation globale. L'assemblage des éléments est détaillé dans le chapitre 3 et a constitué l'objectif principal de ce stage.

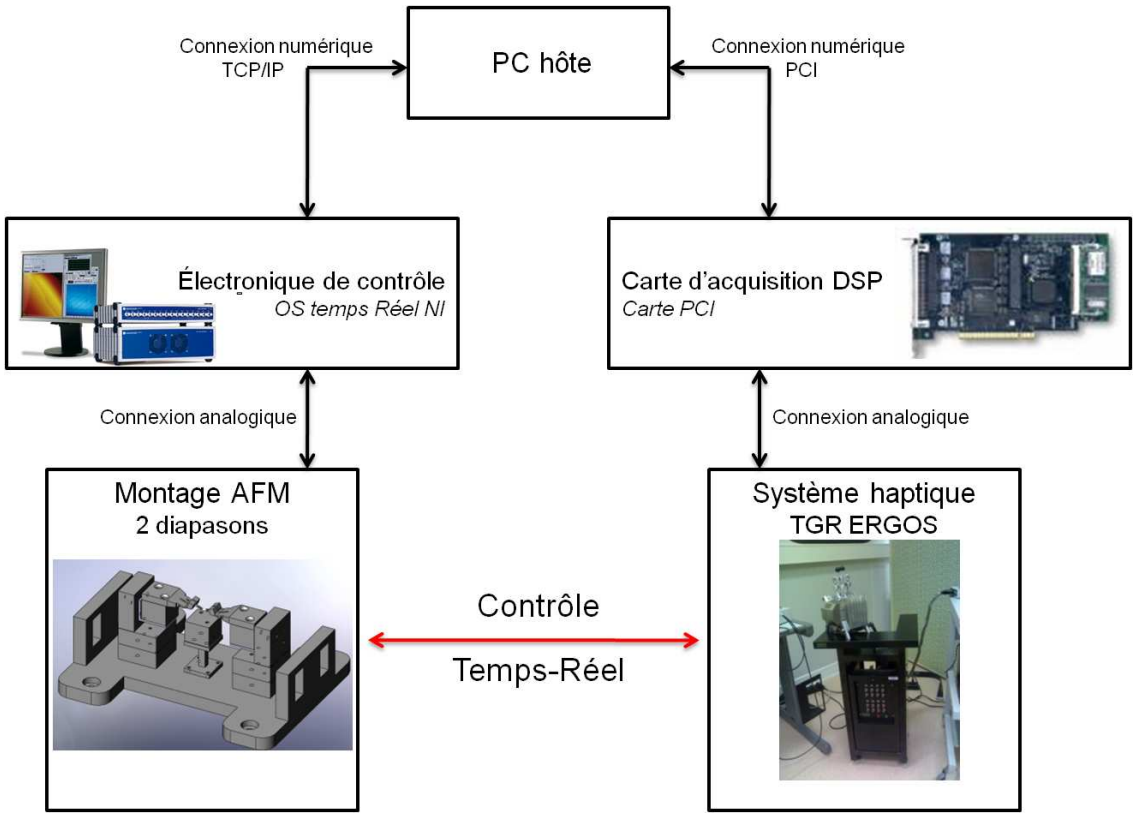


FIG. 1.12 – Bilan du montage Nano-Pince avec tous les éléments principaux qui le composent

Chapitre 2

L'humain au centre du Nano Monde

Fig. 2.1 – Transducteur Gestuel Rétroactif (TGR) Ergos

2.1 Intérêt et état de l'art de la nanomanipulation assistée haptiquement

Nous avons vu dans le chapitre précédent que les techniques de nanomanipulation connaissent une évolution constante depuis leur début. Cependant, certaines difficultés subsistent et freinent cette avancée. Le plus gros problème étant le problème de la visibilité. La pointe AFM est notre seul témoin du nano-monde, et elle ne peut pas imager et manipuler en même temps. Les nano préhenseurs mécaniques actuels utilisent pour cela un mode de visualisation externe (optique ou MEB). Mais cela représente pour nous un très fort encombrement stérique inenvisageable pour une intégration sur les lignes de lumière.

Pour leur venir en aide, de nombreux projets de nanomanipulateurs ont fait appel à la réalité virtuelle et aux systèmes imersifs, tels que les systèmes haptiques. Faute de pouvoir « voir » le nano-monde, nous pouvons le reconstruire virtuellement grâce à des algorithmes de prédiction.

La réalité virtuelle connaît un progrès important depuis plusieurs années grâce à l'amélioration continue de la puissance de calcul des processeurs. Elle est devenue un outil essentiel à la science pour représenter et animer, de manières diverses, les données scientifiques. Les applications les plus courantes sont pour le moment : la médecine, l'éducation, l'armée et bien sûr le divertissement.

Les nanotechnologies représentent donc le nouveau défi du monde virtuel. L'objectif est alors de mêler la réalité (mesures réellement accessibles) et réalité virtuelle afin de combler les manques, et ainsi de réaliser une

interface complète permettant à l'utilisateur de s'imerger simplement et intuitivement dans le nano-monde.

Les systèmes haptiques ont, dans cette interface, une place tout particulièrement importante. En effet, les effets mesurés par AFM, sont des forces, des raideurs, des rugosités, etc., le sens le plus à même de percevoir de tels effets est bien entendu le toucher.

Exemples de nanomanipulateurs à interface haptique

Les systèmes haptiques n'en sont plus à leur premier coup d'essai en nanomanipulation et de nombreux projets ont vu le jour depuis une dizaine d'années. La plupart de ces interfaces ne résident que dans la reconstruction d'une surface que l'on peut toucher, à partir des données mesurées par l'AFM. D'autres permettent une interaction en temps réel avec l'échantillon.

Nous présentons ici brièvement quelques-uns de ces systèmes haptiques :

1. **Nanomanipulateur 1D de l'Université de Carnegie Mellon**
   Ce nanomanipulateur est un précurseur, il associe un AFM et une interface haptique à un degré de liberté. Les manipulations envisagées sont de toucher, pousser ou tirer des nano-objets [21] ;
2. **Nanomanipulateur de l'Université Libre de Bruxelles**
   Ce nanomanipulateur commande un AFM selon les 3 translations XYZ. Les forces applicables pour le retour de force sont de 0.5N pour X et Y et de 1N pour Z. La fréquence de boucle du système –rafraîchissement des valeurs du signal– est de 200Hz. Cette valeur, plutôt faible, a mis à jour le phénomène *d'effet d'échelle*. En effet, la dynamique du nano-monde est beaucoup plus rapide que dans le macro-monde, ce qui a engendré des instabilités du système haptique [12] ;
3. **Nanomanipulateur de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne**
   Ce nanomanipulateur est dédié à la manipulation de nanotubes de carbone. A la différence des deux premiers exemples qui sont des téléopérateurs directs, ce nanomanipulateur utilise une réalité dite « augmentée » par le calcul. Le rendu haptique n'est pas le résultat de mesures de forces temps réel de l'AFM mais d'une simulation d'un modèle physique précis, ici un nanotube. La simulation *prédit* le comportement du nanotube lors de la manipulation et renvoie une information de force à l'utilisateur [7][8] ;
4. **Nanomanipulateur de l'ICA ACROE**
   Ce dernier exemple est tout particulièrement intéressant pour nous puisqu'il utilise le même système haptique que pour la Nano-Pince. Ce manipulateur a été développé en 2006 lors de la thèse de Sylvain Marliere [16]. Il permet le contrôle 1D d'un AFM. La multisensorialité (visuel, sonore et toucher) renvoyée à l'utilisateur est permise par la reconstruction en temps réel d'un espace mixte (réel & virtuel).

2.2 Le système TGR ERGOS

Le Transducteur Gestuel Rétroactif (TGR) utilisé pour le montage Nano-Pince est développé au Laboratoire d'Informatique et Création Artistique (ICA) de Grenoble et commercialisé par la société Ergos Technologies (cf figure 2.1). Le laboratoire ICA s'est associé à l'ESRF pour le développement de la Nano-Pince et s'investit considérablement dans la nanomanipulation. Les performances du TGR ERGOS sont en effet idéales pour cette application et permettent à l'ICA d'enrichir encore un peu plus ces domaines d'activités.

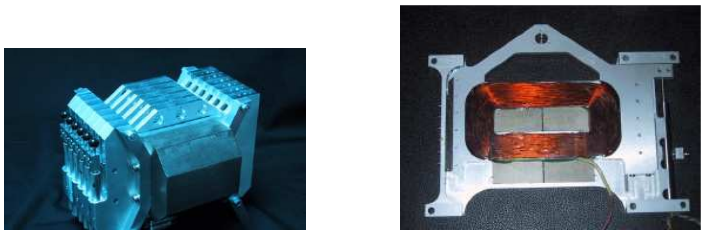
2.2.1 Système de base ERGOS et performances

A l'origine, la gamme de produits Ergos System a été développée pour des applications artistiques. Ils devaient être capables de reproduire le comportement d'instruments de musique (violon, piano, etc.). Son design a respecté plusieurs critères fondamentaux :

- système compact,
- possibilité de modifier le nombre de degré de liberté (DoF),
- polyvalent,

– besoin d'une très grande Bande-Passante afin de restituer un contact dur,
– limiter les effets parasites (friction, jeu mécanique, etc.).

Pour résoudre le problème de polyvalence et de modularité, le système a été divisé en deux parties : le système bloc de base et le système cinématique transformant le mouvement de base en un mouvement propre à l'application voulue.



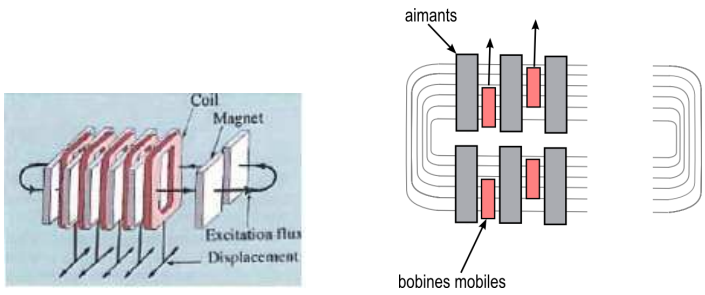
(a) (b)

FIG. 2.2 – L'actionneur de base ERGOS (a) un ensemble de 6 DoF (b) une tranche ouverte

Le bloc de base ERGOS est un ensemble d'actionneurs électrodynamiques multi-axis parallèles. Il est composé d'une succession de tranches comportant chacune une bobine plate mobile et un aimant plat fixe. Chaque bobine, libre selon une translation verticale, représente un degré de liberté. En multipliant le nombre de tranches, on multiplie le nombre de DoF du système permettant ainsi la modularité.

L'empilement de bobines plates crée un flux d'excitation partagé entre les différentes tranches (cf figure 2.3). Cette configuration permet un gain important sur l'épaisseur des tranches par rapport à un système à flux indépendant à chaque tranche [5]. Ainsi la taille minimale obtenue pour une tranche est de 1cm de large pour 10cm de hauteur et 15cm de profondeur (voir figure 2.2). La force maximale permise est de 200N.

Enfin, chaque tranche est équipée d'un capteur de position LVDT (cf Annexe D) d'une précision de $2\mu m$ pour un déplacement total de 25mm.



(a) (b)

FIG. 2.3 – Configuration de l'actionneur modulaire en tranches : bobine mobile pour flux partagé

Le système ERGOS livré au SSL comporte six tranches indépendantes, d'où six degrés de liberté maximum.

Performance du système ERGOS

Une façon traditionnelle de schématiser la chaîne haptique par diagramme bloc est la suivante (Figure 2.4)

Ce diagramme présente le comportement physique de base en terme de loi de Newton pour la masse réelle du transducteur. L'utilisateur et le monde virtuel exercent simultanément des forces sur le transducteur, et il se déplace en conséquence. Si le monde virtuel contient un objet très rigide tel qu'un mur, les forces de réaction sur ce mur arrêteront le transducteur, quelle que soit la force appliquée par l'utilisateur. Si le

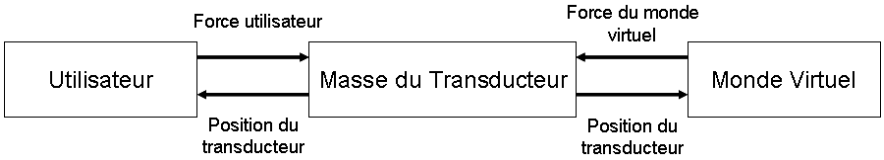


FIG. 2.4 – Schéma bloc de l'interconnexion du transducteur gestuel

monde virtuel n'exerce aucune force, le transducteur suivra les forces appliquées par l'utilisateur selon la loi de Newton *accélération égale force divisée par la masse*, et l'utilisateur pourra ainsi se déplacer librement.

Dans l'un de ses articles, l'équipe haptique du VRAI Group (EPFL) [8] établit des recommandations quant aux performances d'une interface haptique, résumées dans le tableau 2.1. Ces recommandations sont mises en parallèle avec les performances du système ERGOS.

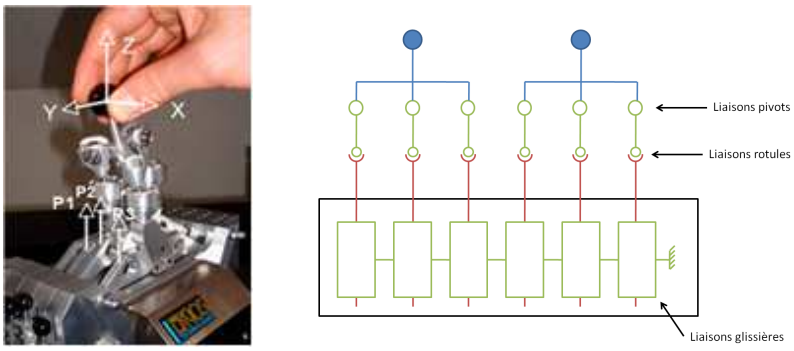
	Caractéristiques Idéales	Caractéristiques ERGOS
mécanique	– faible inertie – forte raideur – faible friction – jeu minimal	– $300g$ par tranche – Force de friction résiduelle $< 10mN$
actuateurs	– rétromanoeuvrable – forte dynamique ($>10^2$) – force suffisante – bonne résolution ($<0,01N$ et $< 0,003Nm$) – bonne précision ($<5\%$)	– Actionneur : Commande en courant 10A, $\pm$50V, 8W, amplification analogique – Maximum de force : 50N en continu et jusqu'à 200N en transitoire – Bande passante en force : $10kHz$ pour un signal de 0 à 200N, $20kHz$ pour un signal de 0 à 50N
capteur de position	– bonne résolution ($< 25\mu m$)	– Capteur inductifs LVDT de fréquence porteuse $30kHz$, linéaires à 99.8%, alimentation 3V – Déplacement total $25mm$ – Résolution en position $2\mu m$ – Bande passante en position $10kHz$
boucle de contrôle locale	– 10 à 20 fois la BP de la boucle globale – haute fréquence ($>1kHz$) – stabilité assurée pour le contact avec les objets virtuels les plus durs	– carte d'acquisition DSP 44kHz
boucle globale d'interaction	– généralement liée à un environnement graphique – idéalement $>20-30Hz$	Indépendant du système ERGOS

TAB. 2.1 – Performances idéales d'un transducteur gestuel (VRAI Group) et caractéristiques du TGR ERGOS

Ce tableau montre que les perfomances du système ERGOS sont tout à fait satisfaisantes et font de lui l'un des meilleurs transducteur gestuel rétroactif du marché actuel. Il allie parfaitement puissance, vitesse et précision.

2.2.2 Morphologie modulaire : Joystick 3D

Sur la structure de base présentée précédemment, sont installés deux joysticks 3D. Chaque joystick utilise trois tranches (cf figure 2.5(a)).



(a) (b)

FIG. 2.5 – Le système haptique ERGOS : (a) L'actionneur multi-axis de base est équipé d'un joystick 3D. Ce dernier convertit les 3 translations parallèles des axes du bloc de base (p_1,p_2,p_3) en un mouvement 3D naturel (XYZ) ; (b) Schéma cinématique du montage 2*Joystick 3D

Ce dispositif comporte 3 roulements et 3 joints sphériques roulants (rotules à billes). Le schéma cinématique du montage est présenté en figure 2.5(b).

La transformation cinématique apportée par le joystick transposant le mouvement vertical des 3 tranches (p_1,p_2,p_3) en un mouvement cartésien (XYZ) est définie par l'équation suivante :

$$(X, Y, Z) = T(p_1, p_2, p_3) \tag{2.1}$$

où $T = \begin{bmatrix} a & 0 & -a \\ b & -2b & b \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 \end{bmatrix}$. Le calcul des coefficients a et b est détaillé dans l'annexe F.

De même pour la transformation des forces appliquées à chaque tranche :

$$(f_1, f_2, f_3) =^t T(F_X, F_Y, F_Z) \tag{2.2}$$

2.2.3 Électronique de contrôle ERGOS

La partie électronique du TGR effectue le lien entre la partie mécanique et l'environnement virtuel géré par la carte DSP.

Deux types d'informations sont traités par l'électronique :
- Les informations de positions livrées par les capteurs LVDT de chaque tranche ;
- Les ordres de forces envoyés aux actionneurs électrodynamiques de chaque tranche.

Composition & Fonction de l'Électronique

L'électronique du système TGR se compose de 4 cartes principales :
- **carte CAPTEUR** qui gère les signaux de positions ;
- **carte PUISSANCE** 1 et 2 qui traitent les signaux des actionneurs ;
- **carte FACADE** qui permet la communication avec l'utilisateur.

Son rôle est d'établir le lien entre les grandeurs réelles du mouvement du joystick et leurs représentations virtuelles. La figure 2.6 décrit les différents points d'action (en rouge) de l'utilisateur sur la chaîne reliant les grandeurs réelles x et f aux grandeurs virtuelles X et F, ce sont les différents gains ou potentiomètres de l'électronique.
- Les offsets OX et OF, accessibles sur la carte façade, permettent le réglage des zéros de position et de force.
- Les coefficients de réglage analogique G_x et G_f. Ils déterminent la plage maximale du déplacement et de la force. Un bon réglage de ces coefficients permet d'avoir une meilleure résolution numérique lors de la conversion analogique/numérique ou numérique/analogique.

– Les coefficients de réglage numérique G_X et G_F. Ils permettent de réaliser l'étalonnage statique en déplacement et en force.

L'étalonnage statique consiste à observer simultanément les différentes grandeurs de mesures réelles et grandeurs virtuelles en régime statique et régler les différents Gains pour ajuster les relations (rapports) en régime statique entre grandeurs correspondant à des valeurs fixées à priori.

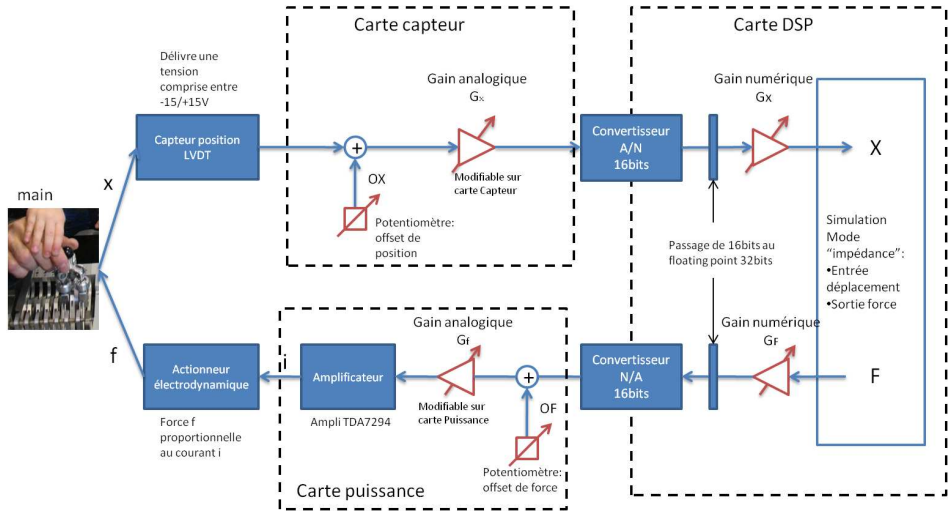


FIG. 2.6 – Schéma fonctionnel de l'électronique du TGR ERGOS pour 1DoF

La relation entre les grandeurs x et X et entre f et F, peut donc s'exprimer en fonction de ces gains :

$$X = \alpha_x * x \tag{2.3}$$

où $\alpha_x = G_x * G_X * \alpha$ et,

$$f = \beta_f * F \tag{2.4}$$

où $\beta_f = G_f * G_F * \beta$.

α et β sont des opérateur de transduction associés aux convertisseurs et à tous les éléments des chaînes de capture et d'actionnement. Leurs modèles (fonction de transfert) qui dépendent entre autre de la fréquence d'échantillonnage ne sont pas connus à priori avec une très grande précision, par contre ils sont très stables.

Carte CAPTEUR

Le rôle de la carte CAPTEUR est d'acquérir et de traiter les signaux provenant des LVDTs.

Elle génère donc le signal sinusoïdal qui alimente les LVDTs (cf Annexe D) puis analyse la tension v_0 pour en extraire la composante x, qui représente notre information de position. Toutes ces fonctions sont illustrées sur la figure 2.7.

Carte PUISSANCE

L'électronique contient deux cartes puissances identiques qui gèrent chacune 4 tranches. Leur rôle est de fournir l'amplification suffisante, grâce aux amplificateurs TDA7294, pour alimenter en courant les actionneurs de la partie mécanique à partir des signaux de commande [-10V ;10V] générés par le DSP.

Le schéma figure 2.8 résume le circuit électrique de la carte PUISSANCE pour une seule tranche, on retrouve ces mêmes composants quatre fois sur chaque carte PUISSANCE. On peut remarquer que les tensions de puissance T+ et T- ne vont pas directement aux actionneurs mais passent tout d'abord par la carte façade. Cette dernière comporte un interrupteur 3 positions qui permet d'alimenter ou non les actionneurs, ou encore d'inverser les tensions T+ et T- (applique la force dans le sens opposé).

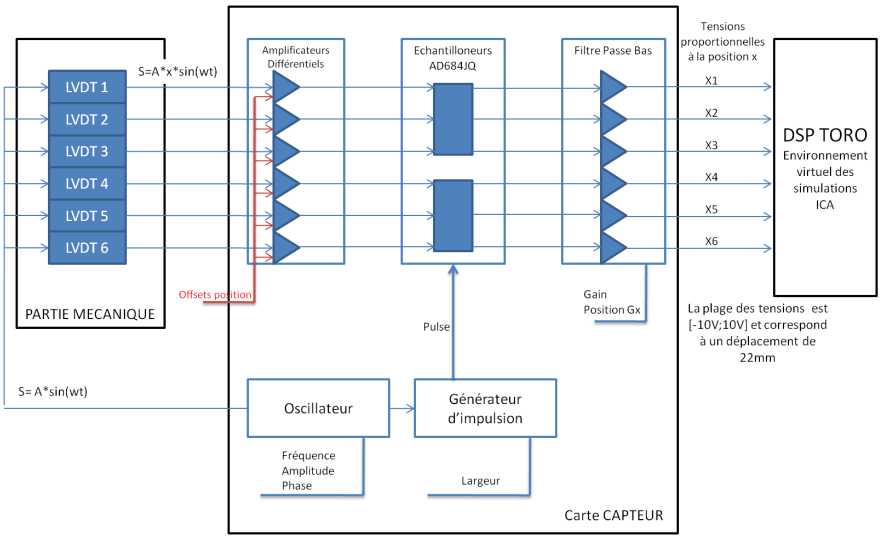


FIG. 2.7 – Bilan carte CAPTEUR

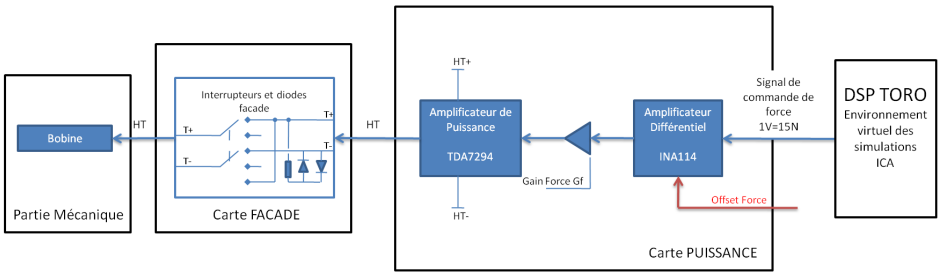


FIG. 2.8 – Bilan carte PUISSANCE

Carte FACADE

La carte FACADE est le lien entre l'utilisateur et l'électronique. C'est en effet sur cette dernière que se trouvent les diodes, interrupteurs et potentiomètres qui sont utilisés pour les réglages du TGR. S'y trouve également le système d'allumage de la Haute Tension, qui a pour but de protéger les amplificateurs TDA7294 de toute variation brusque de la tension grâce à des capacités de $4,7mF$.

2.2.4 La carte DSP Toro

De nombreux environnements virtuels et simulations existent déjà pour l'utilisation du TGR ERGOS.

Ces programmes de simulations sont exécutés par un DSP. Le laboratoire ICA utilise le DSP Toro de la société ACQUISYS qui présente de très bonnes caractéristiques : 16 voies d'entrées/sorties analogiques simultanées de présicion 16bit, 250kHz de fréquence d'échantillonnage, etc. Le DSP est programmé en C++ à l'aide du logiciel Code Composer Studio.

L'annexe E présente les bases du système de modélisation utilisé par l'ICA et quelques exemples de simulations préexistantes.

Chapitre 3

Programmation de l'Interface TGR/AFM du projet Nano Pince

Les chapitres précédents ont permis de découvrir et de comprendre les deux principaux éléments du montage Nano-Pince, à savoir le montage AFM basé sur le couplage de deux têtes à sonde diapason et le transducteur gestuel Ergos.

Ce dernier chapitre présente le travail réalisé sur l'interface homme/machine réunissant ces deux éléments. La version définitive de cette interface, qui nécessite un temps de travail plus important (un sujet de thèse est prévu à cet effet entre 2010 et 2012), n'a bien entendu pas pu être réalisée sur la durée de ce stage. Ce travail a néanmoins permis de déterminer la configuration optimale du montage selon les besoins du projet, et présente les éléments définitifs de cette interface.

Les sections de ce chapitre présentent les évolutions du montage selon un ordre chronologique.

3.1 État initial

La première étape fut de se familiariser avec l'ensemble des éléments du montage initialement présent au laboratoire et les possibilités offertes par chacun d'eux.

Ordinateur hôte

Pour piloter les différentes cibles du système, nous utilisons un ordinateur DELL sous Windows XP. Il est équipé d'un processeur Intel(R) Core(TM)2 CPU de 2.13GHz. La mémoire RAM est de 1GB.

Il comportait déjà le logiciel Nanonis, permettant le pilotage de l'électronique Nanonis (voir le paragraphe ci-après), ainsi que le logiciel Labview.

Électronique Nanonis

L'électronique Nanonis, qui a déjà été évoquée dans le chapitre 1, est une électronique commerciale de contrôle de tout type de sonde à champ proche utilisée pour la caractérisation de surface. Elle propose un très grand nombre de fonctionnalités propre à chaque type de sonde.

Ce système est entièrement numérique, offrant ainsi une grande flexibilité. Le traitement des signaux est assuré par deux cartes FPGA NI-7813R de chez National Instruments pour le modèle de base, mais des modules optionnels peuvent être ajoutés. Ces cartes FPGA sont pilotées par un OS Temps-Réel également de chez National Instruments assurant ainsi la gestion temps-réel des applications. Cet OS est connecté à l'ordinateur hôte via une communication TCP/IP.

L'ensemble des programmes des cartes FPGA et de l'OS Temps-Réel a été programmé sous langage Labview. Par ailleurs, Nanonis met à disposition de nombreuses librairies Labview offrant la possibilité de

communiquer avec l'électronique NANONIS à partir de programmes propres à notre montage. La plupart des entrées ou sorties analogiques répondent à une fonction précise du programme, d'autres sont libres et utilisables pour la connexion d'instruments de mesures externes.

Moteur Pas-à-Pas MECHONICS

Les moteurs inertiels pas-à-pas utilisés sur le montage *Nano-Pince* proviennent de la société allemande MECHONICS AG. Le principe de fonctionnement de ces moteurs a été vu dans la section 1.3.3 et n'est pas redétaillé ici. Ils ont été choisis pour leurs excellentes performances mécaniques, offrant la possibilité de travailler à l'air ou sous vide. Ils sont pilotés à partir du logiciel fourni (cf figure 3.1(a)) ou bien à partir d'interfaces Labview personnelles (mise à disposition des librairies correspondantes).

Ils possèdent néanmoins une faiblesse importante, provenant du contrôleur. Le contrôleur est un boîtier compact, illustré sur la figure 3.1(b), connecté au PC hôte via un port USB. Plusieurs contrôleurs ont connu certains dysfonctionnements pendant toute la durée du stage, ils n'étaient pas toujours reconnus par le PC hôte malgré l'installation des bons drivers, ou certains ne fonctionnaient pas à partir des interfaces Labview. Ils ont donc effectué plusieurs allers-retours en Allemagne pour être réinitialisés.

Chaque contrôleur permet de piloter 3 moteurs, qui peuvent être assemblés pour former un positionneur en XYZ (voir figure 3.1(c)). Les paramètres du mouvement sont le nombre de pas effectués et la vitesse d'exécution. Ainsi, à chaque sollicitation, le moteur se déplacera du nombre de pas voulu, à la vitesse enregistrée. Pour rappel, les pas des moteurs MechOnics utilisés sont d'environ $30nm$ et la course maximale est de $1cm$.

(a) (b) (c)

FIG. 3.1 – Moteur Pas-à-Pas MechOnics (a) Logiciel de pilotage MechOnics (b) Illustration du contrôleur MechOnics (c) Assemblage de 3 moteurs permettant le positionnement en XYZ

Scanner piézoélectrique PIEZOJENA

Pour les déplacements plus fins, nous utilisons un scanner piézoélectrique de la société PIEZOSYSTEMJENA. Il permet un déplacement de $38\mu m$ dans les 3 directions de l'espace XYZ avec une précision de $0.07nm$ (donnée constructeur). Il est constitué de trois éléments piézoélectriques pour effectuer des déplacements découplés selon X,Y ou Z. Il est équipé de 3 connecteurs Lemo.

Le fonctionnement de ce moteur est différent de celui des MechOnics. La position de ce moteur est ici proportionnelle à la tension appliquée à ses bornes. La plage de tension de fonctionnement est de [-10 ;150V] pour chaque direction. Pour alimenter nos scanners nous pouvons utiliser au choix :

- L'amplificateur PIEZOJENA NV 40/3 CLE prévu à cet effet (figure 3.2(a)). C'est l'amplificateur optimisé pour cette application puisque son fonctionnement y est dédié. Les signaux de commande varient de 0 à 10V.
- L'amplificateur NANONIS (figure 3.2(b)) qui est un module optionnel de l'électronique Nanonis permet l'alimentation en Haute Tension des éléments piézoélectriques du montage. Cependant, un seul

module amplificateur peut être installé sur l'électronique et notre montage comporte deux moteurs piézoélectriques.

(a) (b)

FIG. 3.2 – (a) Amplificateur HT PIEZOJENA NV 40/3 CLE (b) Amplificateur HT NANONIS

TGR ERGOS

Le système TGR ERGOS a été présenté en détails dans le chapitre 2, inutile donc de revenir sur son fonctionnement. Nous développons ici le travail effectué pour permettre l'intégration du système ERGOS dans notre montage.

En effet, à l'origine, le produit Ergos est un système fermé, ne permettant pas la communication avec des appareils extérieurs. Il est connecté à la carte DSP Toro contenue dans l'ordinateur livré simultanément par Ergos via un câble sub-D 37pin. Un boîtier vampire a donc été réalisé pour extraire les signaux échangés entre le DSP et le TGR (cf figure 3.3). Ce boîtier a tout naturellement servi, par la suite, de connecteur entre le TGR et le reste du montage.

Les informations échangées avec le TGR sont :

- les 6 signaux de position délivrés par les capteurs LVDT qui varient linéairement en fonction de la position de [-10V ;10V] pour une position variant de [-11mm ;11mm] ;
- les 6 signaux de commande de forces envoyés à l'électronique pour le contrôle des actionneurs électrodynamiques. Pour un signal de commande de 1V, la force correspondante est d'environ 14N.

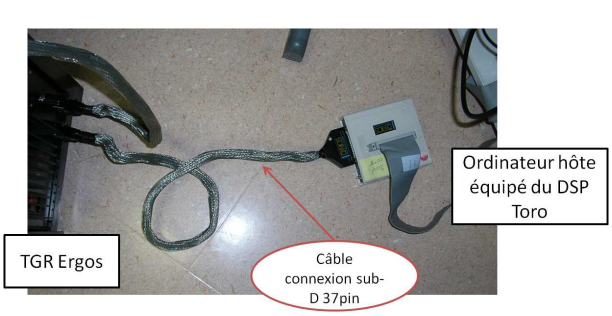
LABVIEW

Le choix de Labview comme langage de programmation fut très rapidement une évidence. Il ne présente en effet presque que des avantages :

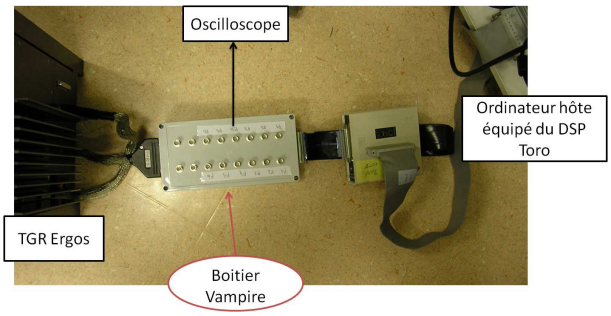
- tous les systèmes utilisés pour le montage sont compatibles avec Labview, et contrôlables à partir de programmes Labview personnels. En particulier l'électronique NANONIS, entièrement programmable à partir de Labview, en perdant néanmoins l'aspect déterministe de l'OS Temps-Réel de NATIONAL INSTRUMENTS puisque nos programmes personnels ont pour cible l'OS Windows du PC hôte ;
- simplicité et convivialité du langage facilitant le développement et la modularité du programme ;
- logiciel déjà présent sur l'ordinateur hôte, le laboratoire possédant plusieurs licences ;
- possibilité d'ajouter du matériel (webcam, cibles FPGA, DSP, etc.) facilement.

Les inconvénients sont peu nombreux mais néanmoins présents :

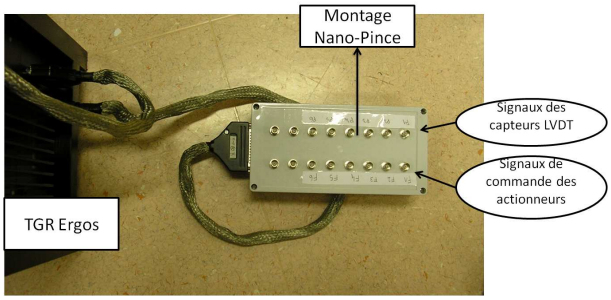
- impossibilité d'intégrer le travail de programmation déjà effectué par le laboratoire ICA sur le nanomanipulateur (travail de thèse de Sylvain Marliere [16]). En effet, le DSP Toro utilisé par l'ICA est programmé en C++ par l'intermédiaire du logiciel Code Conposer Studio et les simulations (présentées en Annexe E) sont compatibles sous Linux uniquement. Il sera donc nécessaire de trouver une solution pour intégrer les simulations déjà existantes à notre interface ;
- incompatibilité de la webcam utilisée pour le montage. Elle fait partie de la très courte liste de webcams qui ne sont pas reconnues immédiatement par Labview. Son utilisation n'est pas impossible puisqu'il existe des bibliothèques logiciels, telle que Imaq Vision, qui permettent d'intégrer de nouveaux périphériques de vision, mais ce problème n'a toujours pas été résolu. Nous envisageons l'achat d'une nouvelle webcam pour faciliter son intégration.



(a)



(b)



(c)

FIG. 3.3 – (a) Câble sub-D 37pin reliant le DSP Toro au TGR Ergos (b) Boîtier vampire monté sur le câble pour en extraire les signaux échangés (c) Connexion possible avec le reste du montage

3.2 Description de l'interface *Nano-Pince* 0.1

Après quelques essais de connexions de chaque élément du montage individuellement afin de se familiariser avec les différentes librairies disponibles et corriger certains dysfonctionnements, ce premier montage a pu être réalisé. Ne nécessitant pas de nouveau matériel, il était réalisable à partir des éléments déjà présents.

3.2.1 Ergonomie du mouvement

Avant de se lancer dans la programmation de l'interface, nous avons tout d'abord réfléchi à l'ergonomie du mouvement réalisé par l'utilisateur pour contrôler le mouvement de la pointe. La solution envisagée était de piloter la pointe dans les 3 translations de l'espace à partir d'un joystick 3D Ergos.

Cependant, nous avons rapidement réalisé que le mouvement 3D attendu pour les joysticks 3D Ergos n'était pas aussi simple que prévu. En effet, le volume de déplacement de ces joysticks est de la forme d'une lentille. Ce volume est illustré sur la figure 3.4.

L'amplitude maximale du mouvement selon X et Y est d'environ $70mm$. L'amplitude selon Z est maximale pour la position $(X;Y) = (0;0)$ où elle vaut $22mm$. Cette amplitude diminue très rapidement lorsque l'on quitte cette position centrale, c'est-à-dire que pour des positions extrêmes en X ou Y, l'amplitude selon Z n'est que de $5mm$.

Or, le mouvement souhaité pour la sonde AFM est un mouvement cubique de $38\mu m$ dans les 3 directions X, Y et Z. Cela signifie que des mouvements différents du joystick, par exemple un mouvement de $22mm$ selon Z en position $(X;Y) = (0;0)$ et un mouvement de $5mm$ selon Z pour la position $(X;Y) = (35;0)$ représenteraient le même déplacement de la sonde AFM, à savoir $38\mu m$ sur Z.

Il y a donc une distortion importante entre le volume de déplacement du joystick et celui de la sonde. Cette distortion n'est pas naturelle pour l'esprit humain et entraînerait des difficultés pour manipuler la sonde précisément.

La solution que nous avons choisie pour ce premier montage est de découpler le mouvement 3D. Le joystick n°1 assure le mouvement 2D selon Oxy. Il utilise pour cela trois tranches. Nous n'utilisons ensuite qu'une seule tranche du joystick n°2 pour assurer le mouvement 1D selon Oz. Le total de tranches utilisées est donc de 4 pour 3 degrés de liberté.

De plus, seule la tranche assurant le mouvement en Z est pourvue d'un retour de force, la force mesurée par le diapason étant la composante selon Z de l'interaction pointe-surface.

Cette configuration ne nous permet alors plus de contrôler les 2 sondes simultanément puisque les 2 joysticks sont nécessaires pour le mouvement d'une seule sonde.

Nous évitons ainsi le problème du mouvement 3D mais à terme, l'objectif est bien d'assurer le mouvement 3D à partir d'un seul joystick. Nous verrons dans la section 3.3 ci-après que l'apport d'un nouveau support de calcul (DSP) nous a permis de résoudre ce problème différemment.

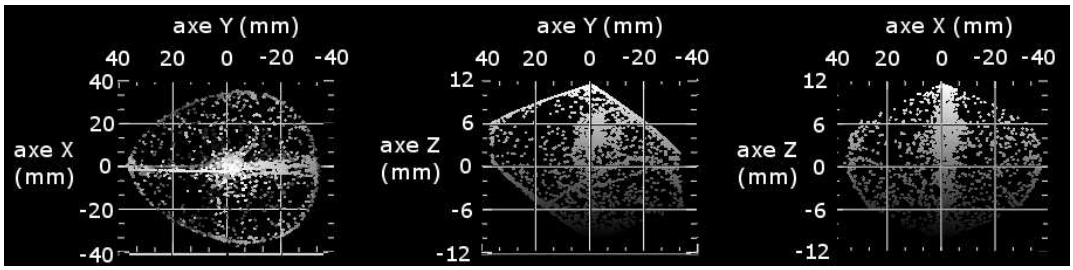


FIG. 3.4 – Représentation du volume de déplacement d'un joystick 3D ERGOS en sauvegardant les coordonnées de 5000 positions du joystick en mouvement.

3.2.2 Déroulement du programme *Nano-Pince* 0.1

Labview Windows

Comme mentionné dans le paragraphe 3.1, nous utilisons le langage Laview pour la programmation de notre interface. Pour ce premier montage, la cible de notre programme Labview est l'OS Windows du PC hôte. La vitesse de boucle du programme est alors limitée à 1kHz, ce qui représente également la fréquence d'échantillonnage du système. Nous manquons également de contrôle sur l'horloge du programme car ce système n'est pas déterministe, des applications de Windows pouvant interférer avec le déroulement du programme. Cette configuration, beaucoup trop lente, représente la première grande limitation du système.

Lors de la manipulation, notre interface *Nano-Pince* fonctionne en parallèle du logiciel NANONIS. Ce deuxième programme a pour cible l'OS Temps-Réel et les cartes FPGA de NANONIS. Les deux programmes *Nano-Pince* et NANONIS échangent des données en continu lors de leur fonctionnement. Les deux OS communiquent selon un protocole TCP/IP, ce qui représente la deuxième limitation du système. En effet, le protocole TCP/IP est lent et irrégulier, ce qui est tout à fait inapproprié pour un contrôle Temps-Réel de la pointe AFM.

Chacun des deux programmes réalise certaines tâches spécifiques. Les fonctions réalisées par NANONIS sont :

- la gestion de l'excitation et l'analyse du signal du diapason (module OC4). Nous rappelons ici que toutes les mesures AFM ont été réalisées avec la PLL active pour observer la variation de fréquence du diapason lors d'une interaction pointe-surface (cf section 1.2.3) ;
- l'acquisition et la génération de tous les signaux analogiques du montage.

Le programme *Nano-Pince* gère la position des moteurs : moteurs pas-à-pas MechOnics ou scanners piézoélectriques, par actionnement des deux joysticks ERGOS.

De manière plus précise, le programme contrôle la position de la pointe n°1 par l'intermédiaire des moteurs pas-à-pas ou du scanner et il contrôle la position de la pointe n°2 grâce aux moteurs pas-à-pas uniquement, le laboratoire ne possédant qu'un seul scanner piézoélectrique au moment de ces manipulations. La deuxième fonction du programme est de générer le signal de commande du retour haptique du TGR ERGOS.

Les Entrées/Sorties

Toutes les Entrées/Sorties du programme sont des signaux numériques, le programme ne commande aucun convertisseur analogique/numérique (CAN) pour l'acquisition de signaux analogiques. Il se contente uniquement de communiquer les informations avec l'OS NANONIS au prix de la lenteur du protocole TCP/IP, c'est ensuite l'OS NANONIS qui pilote lui-même les CAN des cartes FPGA de l'électronique NANONIS pour acquérir ou générer les signaux analogiques. Les connexions sont illustrées sur la figure 3.5.

Les entrées du programme *Nano-Pince* sont :
- les 4 signaux de position P_1, P_2, P_3 et P_4 des 4 tranches du TGR utilisées, variant de [-10V ;10V], ils correspondent à un déplacement de [-11mm ;11mm] de chaque tranche ;
- la variation de fréquence Δf du diapason, déterminée par le programme NANONIS (module OC4, voir le paragraphe 1.2.3). Son unité est le Hertz.

Les sorties du programme *Nano-Pince* sont :
- les 3 signaux de position X, Y et Z du scanner piézoélectrique, ils sont calculés en mètre. Ils sont communiqués à l'OS NANONIS qui les convertit lui-même en tensions de commande [0 ;10V] en fonction des paramètres du scanner piézoélectrique ;
- les signaux de commande des 3 moteurs MechOnics de la pointe n°1. Ces signaux sont des informations logiques : sollicitation ou non du moteur. S'il y a sollicitation, le contrôleur MechOnics (cf figure 3.1(b)) actionnera le moteur du nombre de pas paramétré à la vitesse enregistrée. Les signaux MechOnics sont les seuls à ne pas être communiqués à l'OS NANONIS puisqu'ils sont connectés par port USB ;
- les signaux de commande des 3 moteurs MechOnics de la pointe n°2 ;
- le signal de commande F_z du retour haptique du TGR. Il est calculé à partir de Δf, ce calcul est détaillé dans la section suivante 3.3. Sa plage de fonctionnement continu est [-3V ;3V], la force maximale appliquée sur le joystick est alors de 50N. Le sens de la force appliquée sur le joystick dépend du signe de F_z.

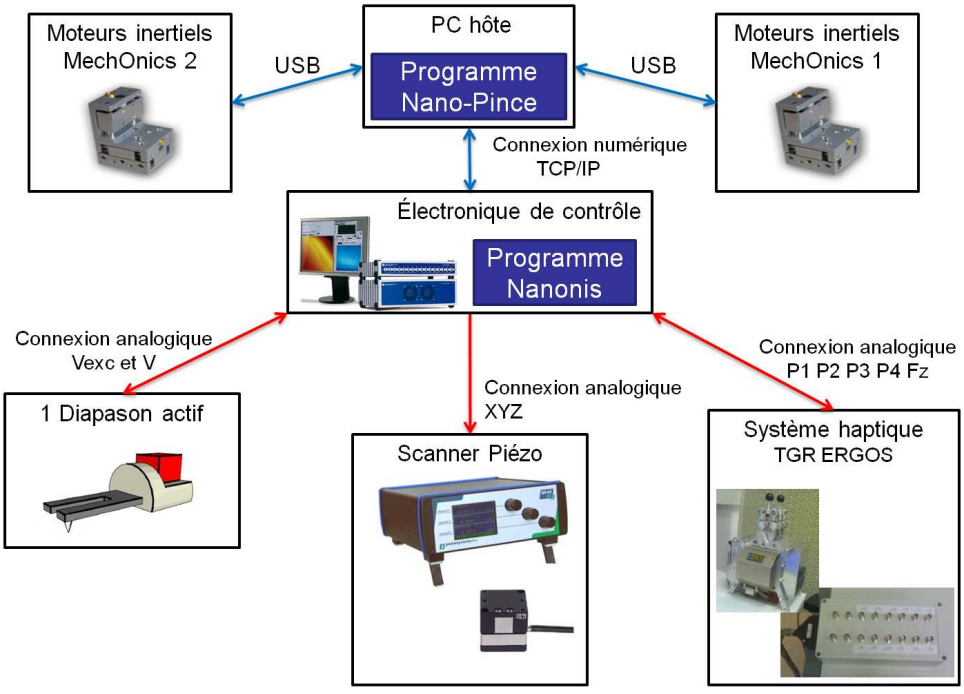


FIG. 3.5 – Schématisation des connexions du montage *Nano-Pince* 0.1. Les flèches rouges représentent les liaisons analogiques et les bleues les liaisons numériques ; chaque flèche est accompagnée de la variable transférée.

Face Avant du programme *Nano-Pince*

La figure 3.6 présente la face avant du programme *Nano-Pince* et les actions possibles par l'utilisateur. Il y a deux menus différents en fonction du type de moteurs sélectionnés.

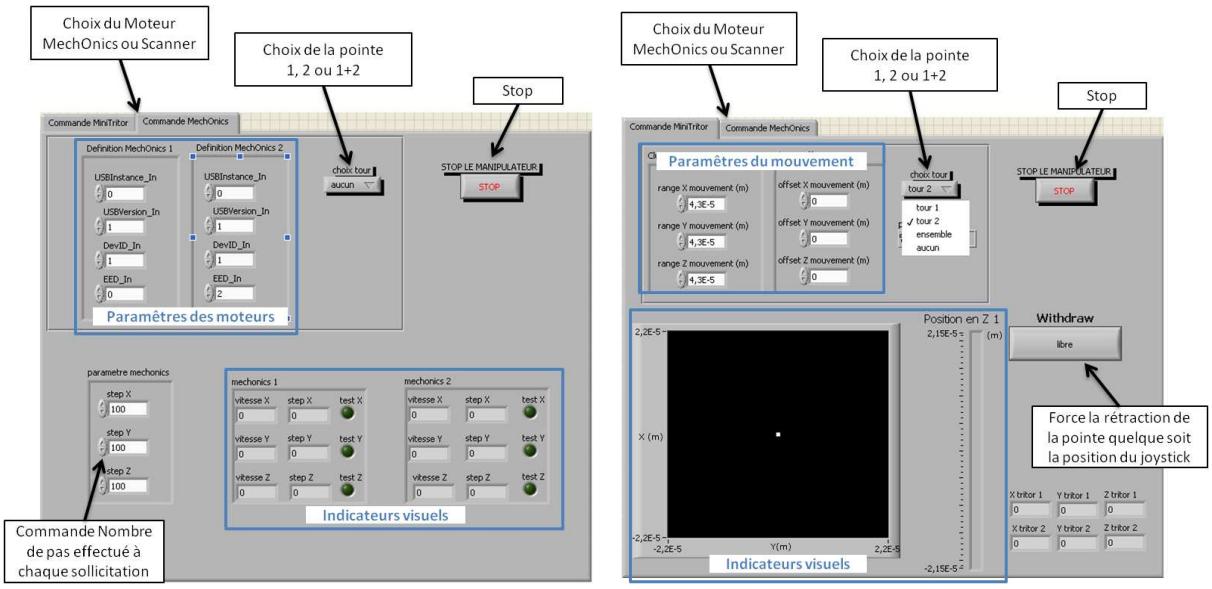
Les commandes communes aux deux menus sont :

- **Choix du moteur** : il permet de basculer d'un menu à l'autre et ainsi de choisir d'actionner les moteurs pas-à-pas MechOnics ou bien le scanner piézoélectrique ;
- **Choix de la pointe** : ce menu déroulant permet de choisir la pointe active, l'utilisateur peut ainsi manipuler la pointe 1 ou la pointe 2. Il peut également choisir de déplacer les deux pointes ensemble en un mouvement parallèle, ou encore de désactiver les deux pointes, figeant ainsi le système ;
- **Stop** : ce bouton permet de fermer ce mode et de revenir au menu principal.

Chaque menu possède ensuite un certain nombre de commandes pour paramétrer le mouvement. Pour les moteurs MechOnics, il y a tout d'abord les commandes de définition permettant au programme de reconnaître les contrôleurs connectés par port USB. Il est ensuite possible de régler le nombre de pas effectués par le moteur à chaque sollicitation, la vitesse quant à elle est contrôlée par l'inclinaison des joysticks.

Pour le scanner piézoélectrique, il est possible de modifier l'amplitude et le centre du mouvement du scanner. L'utilisateur peut ainsi « zoomer » sur une zone précise du volume de déplacement du scanner tout en gardant le même volume de déplacement des joysticks. Ce menu comporte également un bouton de commande nommé **Withdraw** qui force la rétraction de la pointe quelque soit la position des joysticks, cette commande protège la pointe de collisions éventuelles.

Les deux menus comportent également des indicateurs visuels pour permettre à l'utilisateur de situer le mouvement qu'il est en train d'effectuer.



(a) (b)

FIG. 3.6 – Illustration de la face avant du mode *Manipulateur* (a) Menu de contrôle des MechOnics (b) Menu de contrôle du scanner piézoélectrique

Organigramme du mode *Manipulateur*

La figure 3.7 présente un organigramme simplifié du programme *Nano-Pince* pour le mode *Manipulateur*.

1. La première étape du programme est de lire la commande « choix de moteurs » et de sélectionner la partie du code correspondante. Dans les deux cas, l'étape suivante est de lire la commande « choix de la pointe » et de charger les paramètres correspondants.

2. (a) Dans le cas du scanner piézoélectrique actif, le programme lit ensuite les positions P_1, P_2, P_3 et P_4 de chaque tranche et calcule les coordonnées X, Y et Z de la pointe correspondante (voir annexe F pour plus de détails). C'est-à-dire que pour chaque position des joysticks correspond une et une seule position du moteur, le mouvement est réversible. Après avoir lu la commande Withdraw, le programme communique les valeurs X, Y et Z à l'OS NANONIS qui peut alors générer les signaux de commandes analogiques à envoyer à l'amplificateur de Haute Tension PIEZOJENA qui pilote le scanner.

   (b) Dans le deuxième cas des moteurs MechOnics actifs, le programme calcule les coordonnées X, Y et Z puis les compare à des valeurs de référence. Lorsque X, Y ou Z deviennent supérieurs à ces valeurs de référence, le programme sollicite le moteur correspondant. Autrement dit, lorsque les joysticks sont en position de repos $(XYZ) = (000)$, les moteurs sont immobiles, lorsque l'utilisateur incline les joysticks et les sort de cette position de repos, les moteurs sont sollicités à chaque tour de boucle tant que l'utilisateur ne ramène pas les joysticks en position de repos. Le mouvement est ici non réversible. La vitesse de déplacement des moteurs dépend de l'inclinaison des joysticks imposée par l'utilisateur.

3. La dernière étape du programme est la lecture de l'information de variation de fréquence du diapason et le calcul de la force correspondante renvoyée à l'utilisateur. Nous verrons dans la section suivante que cette étape n'a pu être réalisée avec ce montage et il nous a fallu attendre le montage *Nano-Pince* 0.2 pour réussir à programmer le retour haptique sur le TGR ERGOS.

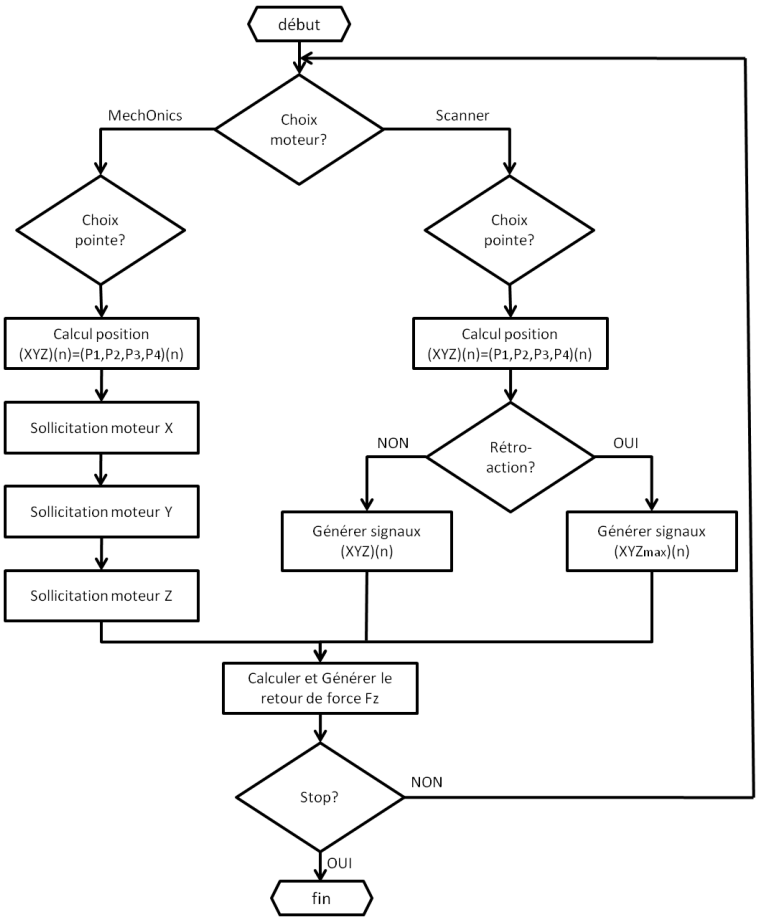


FIG. 3.7 – Organigramme du programme *Nano-Pince*, mode Manipulateur

3.2.3 Les expériences réalisées, les limites observées

Ce premier montage a présenté d'importantes limitations. La principale cause de ces limitations est la temporisation du programme limitée à la milliseconde par notre cible, l'OS Windows. Cette période est également la période d'échantillonnage du système puisque le programme traite les signaux point par point (voir l'organigramme figure 3.7).

Nous avons donc subit d'important effets de recouvrement de spectre dû au théorème de Shannon lors de l'échantillonnage (cf figure 3.8). En effet, pour l'approche sur des surfaces dures et donc des variations rapides de fréquence du diapason, nous avons observé des instabilités du joystick. Celui-ci oscillait à des fréquences à priori sans lien avec un quelconque phénomène physique du nano environnement.

Pour supprimer ces inconvénients, nous aurions pu installé un filtre passe bas de fréquence de coupure $1kHz$ précédant l'échantillonnage. Mais nous aurions alors masqué l'essentiel de l'information mesurée par le diapason et nous nous serions limités à la mesure de contacts très mous (variation de fréquence très lente).

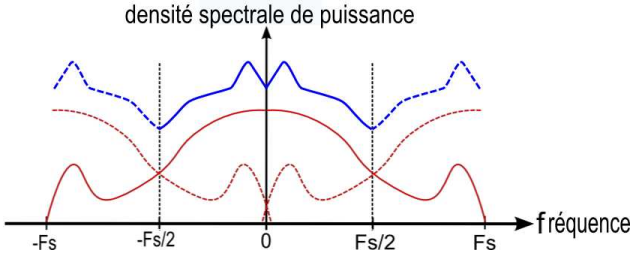


FIG. 3.8 – Schéma du recouvrement spectrale lors de l'échantillonnage : la courbe rouge est la densité spectrale de puissance du signal d'origine, la courbe rouge pointillée représente les périodes de ce signal dues à l'échantillonnage, enfin la courbe bleue est la somme des courbes précédentes et correspond à la densité spectrale de puissance du signal échantillonné. Cette densité est modifiée par rapport au signal d'origine. F_s est la fréquence d'échantillonnage.

Ces observations nous ont amenés à réfléchir sur un nouveau montage, présenté dans la section 3.3 ci-après, doté d'un programme de temporisation beaucoup plus faible, de l'ordre de la microseconde. Ce nouveau montage nécessite bien entendu un nouveau support de calcul.

Micro Manipulation

Nous avons donc choisi de ne pas activer le retour de force pour ce premier montage afin de ne pas subir les inconvénients présentés au paragraphe précédent. Nous avons tout de même pu réaliser un certain nombre d'expériences validant l'apport d'une interface joysticks pour la mise en mouvement des deux sondes AFM.

En absence de retour sensoriel, nous nous sommes limités à des objets de l'ordre du micromètre observables par l'optique. Nous avons ainsi pu manipuler des sphères de verre de $20\mu m$ en 3 dimensions (cf figure 3.9). Nous avons utilisé pour cela les moteurs pas-à-pas MechOnics, le montage ne comportant toujours qu'un seul scanner piézoélectrique.

Nous avons ainsi reproduit une expérience similaire réalisée en 2008 par Alessandro Siria et Simon Le Denmat au laboratoire du SSL (manipulation d'une sphère de latex de $10\mu m$). L'expérience de 2008 avait nécessité deux ordinateurs et deux utilisateurs. L'interface était composée des logiciels MechOnics (cf figure 3.1(a)) installés sur chaque PC. Les deux utilisateurs devaient synchroniser leurs mouvements afin de cliquer simultanément pour synchroniser le mouvement des moteurs des deux sondes AFM. Cette manipulation est très difficilement reproductible.

L'expérience réalisée pendant le stage ne nécessite plus qu'un seul ordinateur et un seul utilisateur pilotant simultanément les deux sondes, la synchronisation étant réalisée par le programme *Nano-Pince*. L'actionnement des moteurs est également plus simple grâce à l'apport des joysticks 3D plutôt qu'une interface logiciel : souris et clavier. Grâce à cette nouvelle interface, la manipulation peut être reproduite très facilement.

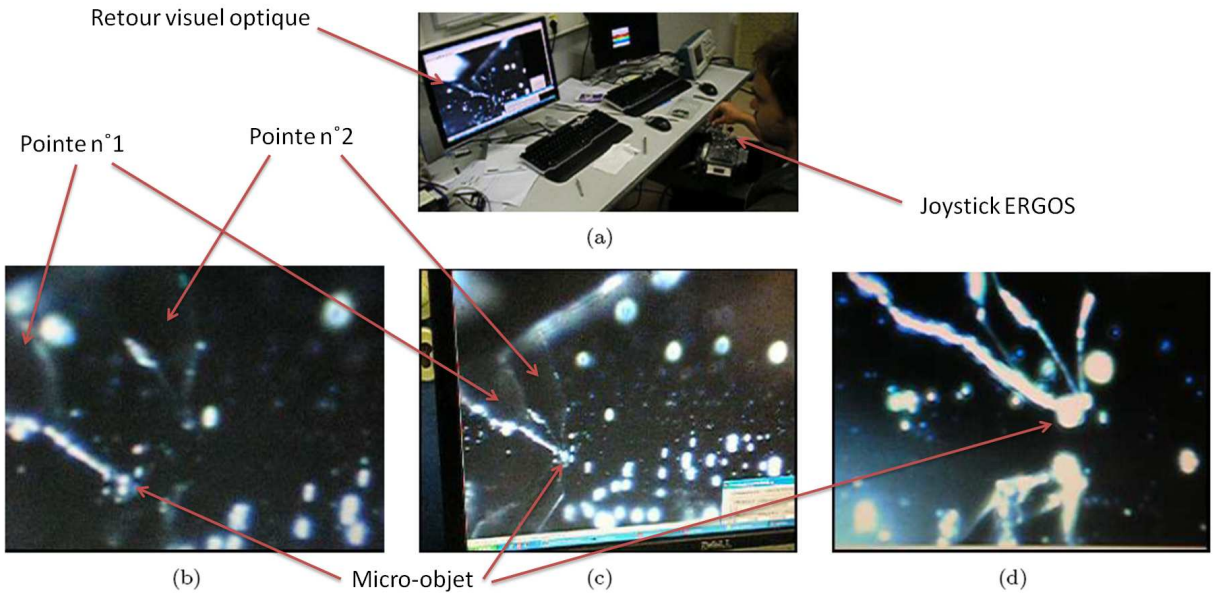


FIG. 3.9 – (a) Contrôle de 2 sondes AFM inactives à l'aide des joysticks ERGOS (b) Approche de la 1^{re} pointe (c) Approche de la 2^{me} pointe (d) Retrait des 2 pointes simultanément après la saisie du micro-objet

3.3 Interface *Nano-Pince* 0.2, utilisation d'un DSP

Suite aux conclusions de la section précédente, nous avons choisi d'inclure un nouveau support de calcul à notre montage.

Notre première idée fut de se tourner vers l'utilisation d'une cible FPGA de chez National Instruments. Le principal avantage de cette solution était que nous disposions d'une carte FPGA au laboratoire et pouvait donc s'inclure rapidement au montage.

Cependant, le FPGA ne semble pas être la solution optimale pour notre utilisation. En effet, les FPGA sont utilisés pour la réalisation de calculs simples –filtre par exemple– et pour une utilisation unique. Ils ne sont, en effet, pas re-configurable facilement – temps de compilation de plusieurs heures– ils ne s'adaptent donc pas à un environnement logiciel complexe et modulable.

C'est pourquoi nous avons finalement choisi de nous tourner vers l'utilisation d'un DSP qui autorise une plus grande souplesse dans la programmation et est facilement re-configurable en cours d'utilisation. Cette solution nous apporte alors une plus grande liberté pour la programmation d'un environnement virtuel complexe et variable afin d'immerger l'utilisateur lors de la manipulation. C'est d'ailleurs le système utilisé par le laboratoire de l'ICA pour la programmation des simulations du TGR, voir la section 2.2.4 sur le DSP Toro.

Notre choix du DSP fut guidé par deux contraintes principales :

1. le nombre d'Entrées/Sorties analogiques. Le DSP doit pouvoir supporter 7 signaux analogiques d'Entrées et 12 signaux analogiques de Sorties pour notre montage actuel ;
2. langage de programmation Labview pour pouvoir s'intégrer rapidement au montage déjà existant.

Cette deuxième contrainte n'a pas permis de réutiliser le DSP Toro de l'ICA non programmable sous Labview.

3.3.1 Présentation du DSP Sheldon Instruments

Pour l'amélioration du montage, nous avons utilisé le DSP SI-C6713DSP de la société SHELDON INSTRUMENTS (SI). Ce DSP nous a été cordialement prêté par un laboratoire de l'ESRF. A partir des conclusions tirées de ce nouveau montage, nous pourrons décider de l'achat d'un DSP.

Les caractéristiques principales du DSP SI sont :
- précision de 32 bits à virgules flottante ou fixe ;
- drivers pour Win98/2000/XP ou Linux ;
- langage de programmation : QuView.

Le langage de programmation QuView est un module additionnel au logiciel Labview. Une palette *QuView* est alors disponible dans le diagramme Labview, toutes les fonctions de cette palette ont pour cible le DSP SI. Ainsi, sur un seul diagramme Labview se côtoient les fonctions ayant pour cible l'OS Windows du PC hôte et celles ayant pour cible le DSP SI, permettant une programmation aisée des communications entre ces deux cibles.

Le langage QuView ne sera pas détaillé dans ce rapport, il faut néanmoins préciser que le DSP respecte une programmation séquentielle. Il faut donc utiliser le câble d'erreur de Labview pour imposer l'ordre des différentes fonctions QuView du diagramme Labview.

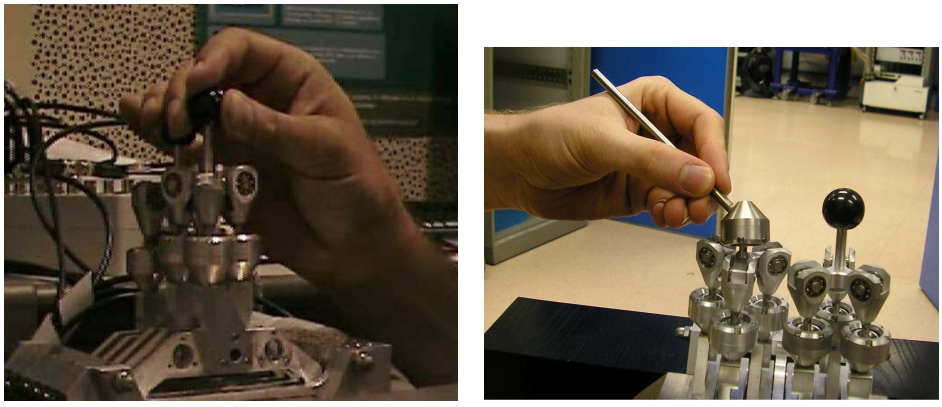
Les conversions analogique/numérique sont assurées par un module additionel à connecter sur la carte PCI-DSP. Les performances clefs sont les suivantes :
- 32 entrées différentielles analogiques de fréquence d'échantillonnage maximale de 250kHz et de résolution 16bit ;
- 16 sorties analogiques à 180kHz de fréquence d'échantillonnage à 16bit de résolution.

Ce DSP respecte donc nos deux contraintes principales puisqu'il possède un nombre suffisant d'entrées/sorties analogiques et est programmable sous Labview. Ses performances semblent correspondre tout à fait à nos besoins.

3.3.2 Ergonomie du mouvement

Les limitations observées avec le montage *Nano-Pince* 0.1 (voir section 3.2.1) peuvent être annulées grâce au retour de force du joystick maintenant permis par le DSP. Par l'intermédiaire du retour haptique du TGR Ergos, il est possible de plonger l'utilisateur dans un environnement physique 3D purement virtuel. L'utilisateur aura ainsi la sensation de « toucher » cet environnement.

Dans notre cas, l'utilisateur doit pouvoir se déplacer librement dans un volume cubique, délimitant l'espace de travail du joystick. Dans ce cube, l'utilisateur ne subit que les forces réellement mesurées par le diapason qui reproduisent les contacts nanoscopiques à l'échelle macroscopique. Lorsque l'utilisateur arrive sur la surface de ce cube virtuel, le DSP génère des forces simulant un contact rigide, l'utilisateur a ainsi la sensation d'être arrivé à la butée mécanique du joystick. Ce cube virtuel doit bien entendu être contenu dans le volume réel



(a) (b)

Fig. 3.10 – (a) Ergonomie initiale du joystick : sphère noire de 1cm de diamètre ; (b) Ergonomie du joystick pour le montage *Nano-Pince* 0.2 : forme de stylo rendant le mouvement plus précis pour de faibles déplacements.

de déplacement du joystick (cf figure 3.4 section 3.2.1), ce qui limite la taille du cube virtuel à $18mm$ de côté. Cette limite est définie par l'amplitude mécanique maximale du joystick selon Z qui est de $22mm$.

Le problème de distortion entre le volume de déplacement du joystick et celui de la sonde AFM est ainsi supprimé, nous permettant de contrôler la sonde en 3 dimensions à l'aide d'un seul joystick.

La résolution de ce problème a néanmoins entraîné un autre inconvénient. Avec l'utilisation du cube virtuel, l'amplitude du joystick est fortement réduite, le côté du cube n'excédant pas $18mm$. L'ergonomie du joystick n'est alors plus idéale pour de tels mouvements fins. Elle est en effet adaptée à des mouvements plan XY de grandes amplitudes (8cm*8cm) utilisés pour les simulations préexistantes de l'ICA (voir Annexe E.4).

Pour permettre à l'utilisateur de manipuler les deux joysticks simultanément (main droite & main gauche) avec précision sur une amplitude n'excédant pas $18mm$, nous avons choisi de modifier l'extrémité du joystick pour la remplacer par un joystick dont la forme est proche de celle d'un stylo (cf figure 3.10). L'action de l'utilisateur est alors similaire au mouvement effectué lors de l'écriture, ce qui apportera une plus grande précision. La symétrie du mouvement des deux pointes AFM facilite la coordination entre les deux mains lors du contrôle des deux joysticks simultanément, et ce, même pour des personnes non ambidextres. A ce jour, ce nouvel embout est toujours en cours de validation.

3.3.3 Déroulement du programme *Nano-Pince* 0.2

L'apport du DSP SI

Les fonctions de l'interface *Nano-Pince* 0.2 ont connu quelques évolutions par rapport au montage 0.1. La fonction de commande des moteurs pas-à-pas MechOnics a été supprimée pour se focaliser dans un premier temps sur le contrôle des scanners piézoélectriques.

Le montage de la tête AFM ne comportant qu'un seul scanner piézoélectrique lors de ce stage, l'interface *Nano-Pince* 0.2 autorise le contrôle d'une seule pointe AFM par l'intermédiaire du scanner piézoélectrique. Le scanner est piloté par un seul joystick 3D Ergos.

Le montage comporte maintenant trois cibles de calculs :

1. **Module OC4** de l'électronique Nanonis
   Comme cela a été présenté dans la section 1.2.3, le module OC4 génère toujours le signal d'excitation du diapason et traite le signal retour du diapason pour en extraire la variation de fréquence lors d'une interaction (Lock-in & PLL). Le signal de fréquence est généré par une sortie analogique de la carte FPGA du module, ce signal est ensuite acquis par le DSP SI (voir ci-après). La liaison entre ces deux cibles est donc analogique et ne présente pas de limitations pour la temporisation du programme.
2. **DSP Sheldon Instruments**
   C'est sur cette cible que prend place notre programme *Nano-Pince*. Le programme calcule la position du joystick et génère les signaux de commandes pour l'actionnement du scanner piézoélectrique. Il acquiert également le signal analogique de variation de fréquence généré par le module OC4 et le convertit en signaux de commande de forces à envoyer aux actionneurs électro-dynamiques des trois tranches du TGR pour le retour de force du joystick.
3. **OS Windows** du PC hôte
   Dans ce montage, l'OS Windows est uniquement utilisé pour le retour visuel destiné à l'utilisateur. Y sont en effet affichés les graphiques des différentes variables calculées par le DSP. Cette cible ne représente donc plus une limitation pour l'interface.

Dans la suite de cette section, nous n'exposerons que la partie du programme ayant pour cible le DSP SI, la seule présentant les fonctions essentielles de l'interface.

Les Entrées/Sorties

A la différence du montage 0.1, les entrées/sorties sont ici exclusivement analogiques (nous n'évoquerons pas les informations numériques échangées avec le PC hôte via un bus PCI, ces informations permettent l'affichage des variables et ne jouent pas un rôle essentiel).

Les entrées du programme *Nano-Pince* 0.2 sont :

– les 3 signaux de position P_1, P_2 et P_3 des 3 tranches du TGR utilisées. Variant de [-10V ;10V], ils correspondent à un déplacement de [-11mm ;11mm] de chaque tranche ;
– la variation de fréquence Δf du diapason générée par le module OC4 NANONIS. Ce signal varie de [-10V ;10V] et représente une plage de fréquence $[f_0 - f_{lim}; f_0 + f_{lim}]$ réglable à partir du logiciel NANONIS.

Les sorties du programme *Nano-Pince* 0.2 sont :
– les 3 signaux de position X, Y et Z du scanner piézoélectrique. Ils varient de [0V ;10V] et représentent l'amplitude de déplacement du scanner : $38\mu m$ dans chaque direction ;
– les 3 signaux de commande de force F_1, F_2 et F_3 des actionneurs électro-dynamiques de chacune des tranches du TGR. Ces signaux varient de [-3V ;3V] et représentent des forces maximales de 50N.

La figure 3.11 schématise toutes les connexions et les variables calculées par chaque cible.

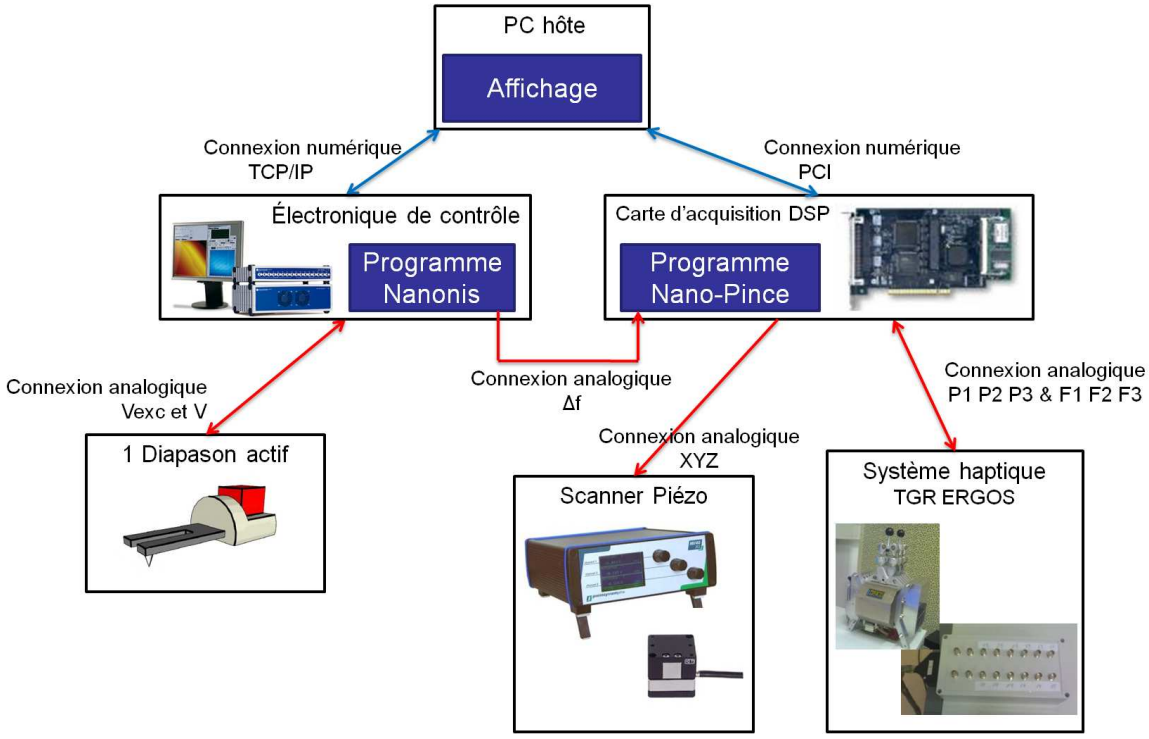


FIG. 3.11 – Schématisation des connexions du montage *Nano-Pince* 0.2. Les flèches rouges représentent les liaisons analogiques et les bleues les liaisons numériques ; chaque flèche est accompagnée de la variable transférée.

Organigramme

La figure 3.12 présente l'organigramme du programme *Nano-Pince* 0.2. Chaque étape de cet organigramme est détaillée ci-après.

Etape 2 Comme tous signaux, P_1,P_2 et P_3 sont bruités. L'origine du bruit est ici multiple :
– bruit interne à l'électronique ERGOS (précision LVDT, grenaille, etc.) ;
– Précision du mouvement humain (tremblements) ;
– bruit lié à la Conversion Analogique/Numérique du signal (bruit de quantification).

Nous considérons les signaux de la forme suivante :

$$P_i(n) = m_i(n) + V(n) \tag{3.1}$$

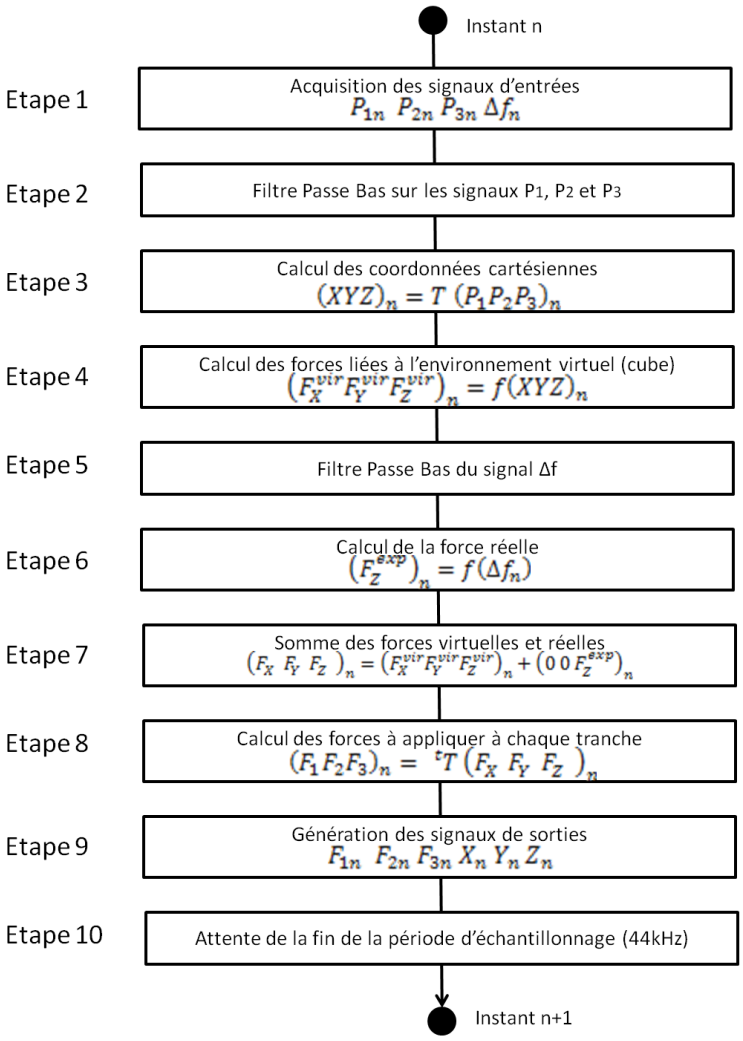


FIG. 3.12 – Organigramme du programme *Nano-Pince* 0.2

où $m_i(n)$ est la moyenne variable et $V(n)$ est une variable aléatoire, indépendante, identiquement distribué, centrée $E[V(n)] = 0$ et de variance $Var[V(n)] = \sigma^2 = 9.57 * 10^{-4} V^2$ (voir figure 3.13). Autrement dit, nous faisons l'approximation que $V(n)$ est un bruit blanc.

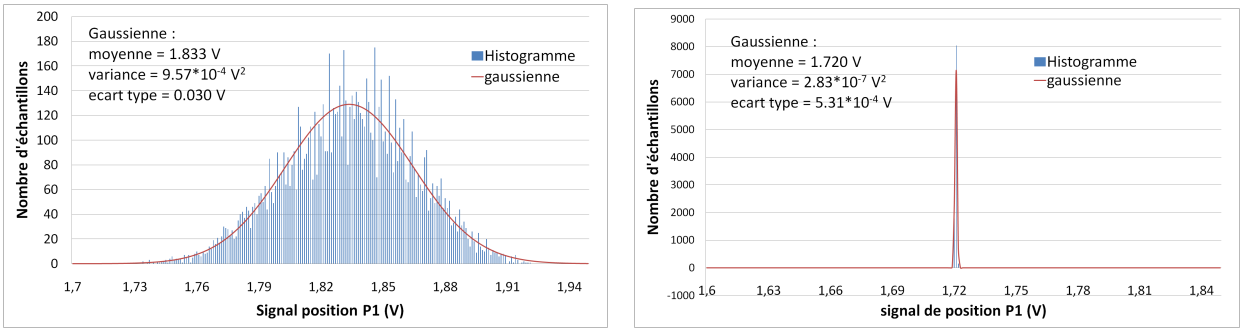
Pour limiter l'impact du bruit, un estimateur adaptatif est inclu dans le programme. Pour chaque échantillon $P_1(n)$ (de même pour $P_2(n)$ et $P_3(n)$), nous utilisons l'estimateur suivant :

$$\hat{P}_{1n} = \frac{1}{N+1} \sum_{i=n-N}^{n} P_{1i} \tag{3.2}$$

La variance de $\hat{P}_{1n}$ est :

$$Var[\hat{P}_1] = \frac{\sigma^2}{N} \tag{3.3}$$

Les moyennes m_1, m_2 et m_3 respectivement des signaux P_1,P_2 et P_3 évoluent lentement (elles dépendent de la vitesse d'actionnement du joystick par l'utilisateur qui est au maximum de quelques Hertz). Nous pouvons donc choisir N très grand pour diminuer au maximum la variance du signal. Nous avons choisi la valeur maximale autorisée par la mémoire du DSP : $N = 500$.



(a) (b)

FIG. 3.13 – Histogramme de la distribution du bruit V(n) du signal de la tranche 1. La moyenne m_1 est ici constante et le signal comporte 10000 échantillons (a) Distribution du bruit avant moyennage (b) Distribution du bruit après moyennage

Etape 3 Le calcul effectué à l'étape 3 permet de convertir les coordonnées verticales des tranches du TGR en un vecteur de coordonnées cartésiennes (XYZ) de la position du joystick (centre de la boule noire). Le calcul est détaillé en annexe F.

Etape 4 Cette étape est la reconstitution de l'environnement 3D virtuel, dans notre cas le cube. En fonction des coordonnées XYZ, le DSP génère ou non les forces virtuelles simulant les contacts avec cet environnement. En d'autres mots, lorsque le joystick est à l'intérieur du cube, ces forces sont nulles, lorsque le joystick entre en contact avec l'une des faces du cube, le DSP génère une force élastique de constante de raideur K importante : simulation d'un contact rigide. L'équation 3.4 illustre le calcul de la force exercée sur le joystick lorsque la coordonnée X devient supérieure à la limite X_{limite} du cube suivant l'axe X :

$$F_X = K * X - X_{limite} \tag{3.4}$$

Etape 5 L'estimateur utilisé à l'étape 5 est identique à celui de l'étape 2. La seule différence vient de la valeur N de nombre de points utilisés pour le calcul de la moyenne. La dynamique du nano-monde étant plus rapide, nous souhaitons conserver une bande passante suffisante. Nous nous limitons donc à N=50.

Cet estimateur sert de filtre passe bas pour le signal Δf de variation de fréquence du diapason. L'origine du bruit de ce signal est complexe :
- bruit thermique au niveau de la mesure du diapason ;
- bruit électronique (effets électro-magnétiques, etc.) ;
- conversion Analogique/Numérique (à noter ici que ce signal subit plusieurs conversion : numérique/analogique au niveau du FPGA NANONIS puis analogique/numérique au niveau du DSP SI) ;
- signal d'erreur du contrôleur PI utilisé pour la PLL NANONIS (voir section 1.2.3).

Etape 6 L'étape 6 représente le lien entre le nano-monde et l'utilisateur. Lors de cette étape, la mesure du diapason est convertie en un signal de force renvoyé à l'utilisateur dans le macro-monde.

Nous pouvons ici effectuer un petit rappel sur la mesure du diapason. Nous mesurons une variation de la fréquence d'excitation du diapason à l'aide d'une PLL. Cette variation de fréquence est proportionnelle au gradient de la force selon Z de l'interaction pointe-surface :

$$\Delta f = -\frac{\epsilon f_0}{2k_r}\frac{\partial F_{P-S}}{\partial z} \tag{3.5}$$

où f_0 est la fréquence de résonance du diapason, k_r sa raideur effective et ϵ un coefficient de symétrie.

La figure 3.15(a) schématise la forme de Δf lors d'une approche-retrait sur deux types de surfaces : une surface dite dure et une surface dite molle. A noter que l'approche-retrait est réversible dans le cas du

diapason car ce dernier est rigide. Il n'y a pas de phénomènes de saut au contact ou au retrait comme pour un cantilever.

Dans nos conditions d'expérimentation, le domaine de force attractive (Van der Waals, capilarité, etc.) est très difficile à observer du fait de la rigidité du diapason. Nous pouvons donc faire l'approximation que $F^Z_{P-S}(z)$ se limite à la force de répulsion de Pauli. La force respecte alors la loi de puissance suivante (cf annexe B.1) :

$$F^Z_{P-S}(z) = \frac{\alpha}{z^n} \qquad 3 \leqslant n \leqslant 13 \tag{3.6}$$

dont le gradient selon Z vaut :

$$\frac{\partial F^Z_{P-S}}{\partial z}(z) = -\frac{n\alpha}{z^{n+1}} \tag{3.7}$$

Les fonctions $f(z) = 1/z^n$ et $f(z) = 1/z^{n+1}$ ont des comportements identiques (monotonie, limites, etc.) comme le montre la figure 3.14 pour le cas $n = 13$ qui correspond au cas idéal d'une pointe constituée d'un seul atome. D'un point de vue haptique, ces deux fonctions représentent des informations très similaire. C'est pourquoi il est possible d'utiliser Δf pour le retour sensoriel sans avoir à calculer F^Z_{P-S}.

En effet, le signe de Δf fournit le sens de la force à appliquer au joystick et son amplitude traduit l'intensité de l'interaction. Cette information qualitative est amplement satisfaisante pour le retour haptique.

La nécessité de calculer quantitativement la force F^Z_{P-S} reste à être prouvée. Si tel est le cas, cela représentera un travail de réflexion important car ce calcul reste encore aujourd'hui complexe.

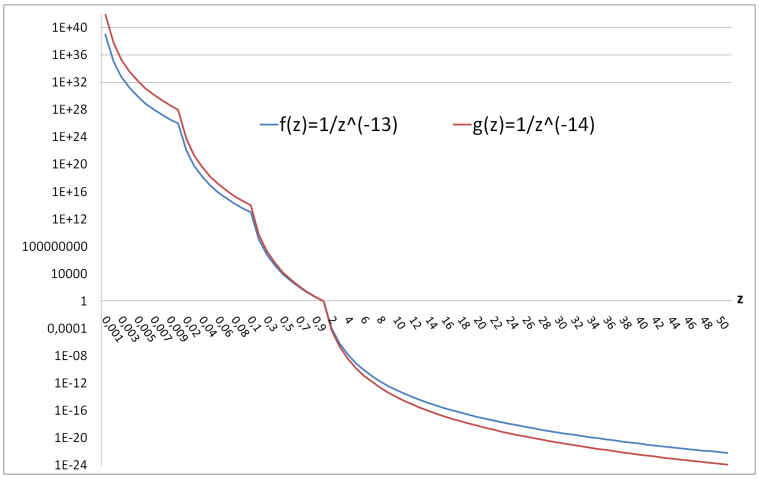


FIG. 3.14 – Représentation des fonctions $f(z) = 1/z^{13}$ et $g(z) = 1/z^{14}$ en échelle logarithmique

D'où le calcul effectué à l'étape 6 :

$$F^{exp}_Z = K_1 * \Delta f + K_2 \tag{3.8}$$

K_2 permet de corriger l'erreur sur la moyenne de Δf si ce dernier n'est pas exactement nul en absence d'interaction. K_2 est donc très faible et peut être considéré comme nul dans la plupart des cas.

K_1 convertit Δf pour l'adapter à la plage de sortie de F^{exp}_Z. Il est généralement réglé tel que F^{exp}_Z varie approximativement de [-3V ;3V] (ce qui représente une force de [-50N ;50N] sur le joystick) lorsque Δf varie de [-10V ;10V]. K_1 reste toutefois réglable par l'utilisateur à tout instant afin d'augmenter ou diminuer sa sensibilité à certaines forces.

Etape 7 Lors de cette étape, le programme somme les forces virtuelles et réelles qui seront appliquées simultanément sur le joystick.

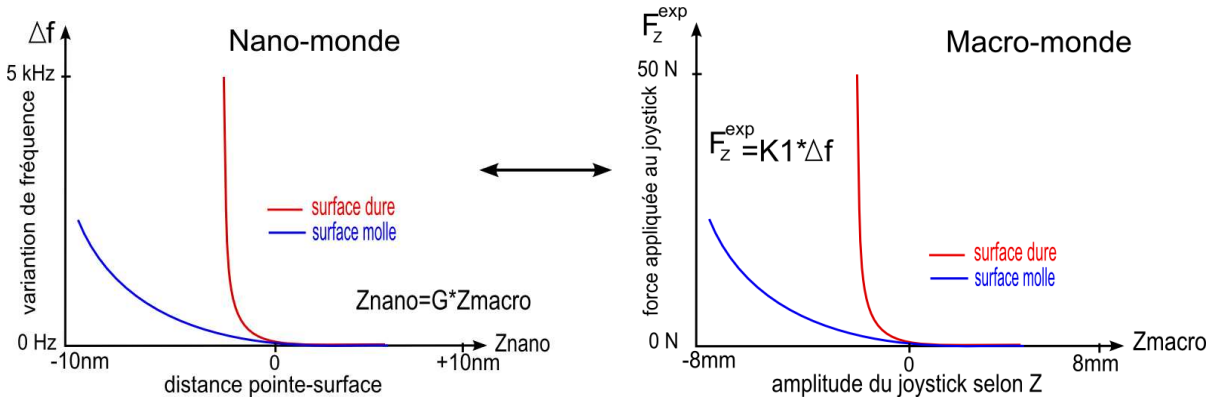


FIG. 3.15 – (a) Schématisation de la courbe de variation de fréquence en fonction de la distance pointe-surface pour 2 types de surfaces ; (b) Courbes correspondantes pour le joystick : force renvoyée à l'utilisateur en fonction de l'amplitude de son mouvement. Le programme *Nano-Pince* crée un lien direct entre le nano-monde et le macro-monde. Les coefficients G et K_1 sont réglables à tout instant.

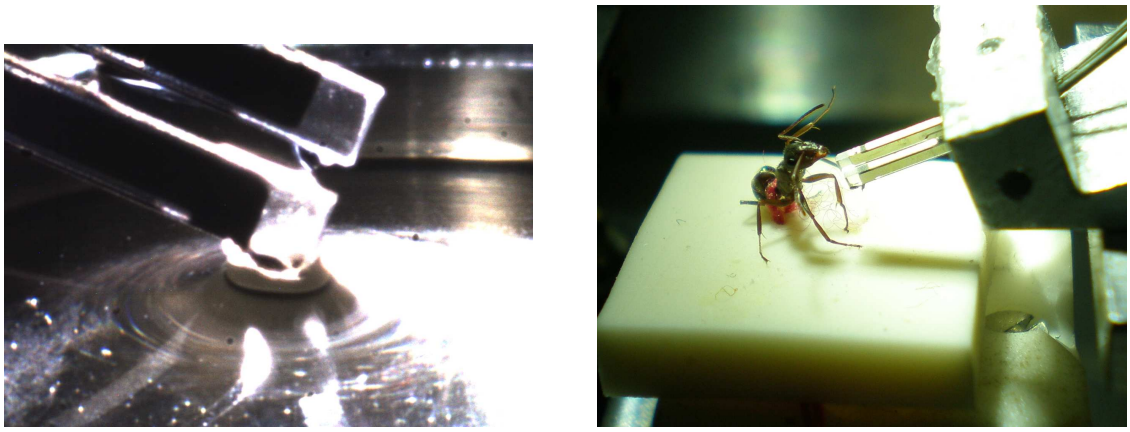
Etape 8 Nous effectuons ici la convertion inverse de l'étape 2, nous connaissons les coordonnées de la force dans le référenciel cartésien XYZ et nous les transposons dans le référentiel vertical des tranches 1, 2 et 3. Le DSP génère ainsi le signal de force de chacune des tranches.

3.3.4 Les expériences réalisées

L'exploitation du montage *Nano-Pince* 0.2 n'est pas encore suffisante puisque le DSP fut opérationnel seulement à la toute fin de ce stage. Cependant quelques expériences qualitatives ont pu être réalisées. Ces expériences visaient à déterminer plusieurs aspects de la *Nano-Pince* :

1. La justesse du retour de force par rapport à l'interaction du nano-monde. Nous avons pour cela « touché » différents types d'échantillons (une surface de silicium dure, une surface de gel de silicone molle). Les résultats de ces expériences sont très positifs. En effet, les différents échantillons sont très différentiables, le retour haptique permet même de déterminer lorsque la pointe se détériore.
2. L'apport d'un nanomanipulateur à retour haptique par rapport à un AFM classique. L'apport principale de la *Nano-Pince* est son aspect temps-réel. L'utilisateur manipule en ayant connaissance à tout instant de l'interaction pointe-surface grâce au retour de force. Une nanomanipulation effectuée par un AFM classique ne permet pas ce retour. L'utilisateur programme un déplacement et l'active, pendant toute la durée de ce dernier, l'utilisateur est « passif ». Ce n'est qu'à la fin du déplacement qu'il peut de nouveau « regarder » son échantillon et voir si il a, ou non, déplacer le nano-objet.

   Quelques expériences ont été réalisées afin de montrer l'intérêt de cet aspect dynamique de la *Nano-Pince*.
   - Appréhension de la tension superficielle d'un surface d'eau. Les résultats de cette manipulation n'ont pas été concluants. En effet, à l'approche du diapason, un important ménisque d'eau se crée brisant la surface d'eau (voir figure 3.16(a)).
   - Contact avec des objets vivants. Reconnaître qu'un objet est réactif est l'un des avantages importants de l'utilisation d'un outil dynamique tel que la *Nano-Pince*. Nous avons donc tenté de toucher la patte d'une fourmi. Malheureusement la taille et la force d'une fourmi ne correspondent pas à une utilisation de la *Nano-Pince* (voir figure 3.16(b)). Des expériences avec des acariens seraient probablement plus convaincantes.



(a) (b)

FIG. 3.16 – (a) Approche d'une sphère de latex hydrophobe de $20\mu m$ collée sur un diapason actif au dessus d'une surface d'eau ; création d'un ménisque autour du diapason avant que la sphère de latex soit en contact avec l'eau. (b) Approche d'un diapason sur une fourmi vivante (toutes les fourmis furent relachées vivantes après manipulation).

3.4 Les Développements futurs

Cette section expose les enseignements tirés de ces deux premiers montages et les objectifs futurs de l'interface *Nano-Pince*.

Le travail réalisé au cours de ce stage n'est qu'une introduction au travail qu'il reste à accomplir jusqu'à la version finale de la *Nano-Pince*. Néanmoins il a permis d'identifier les points clefs et les points difficiles sur lesquels il faudra travailler.

3.4.1 Le montage *Nano-Pince* 0.3

Les montages 0.1 et 0.2 abordent des aspects différents de l'interface. Le montage 0.2, grâce à ces bonnes performances, a permis de se focaliser sur la réalisation du lien temps-réel entre le macro-monde et le nano-monde. Les résultats sont très satisfaisants et l'utilisation d'un DSP comme support de calcul semble essentielle. Les caractéristiques du DSP SHELDON INSTRUMENTS sont bonnes mais il est toujours possible de sonder plus en détails le marché. En absence de retour de force, le montage 0.1 s'est concentré sur les fonctionnalités de l'interface et la navigation entre les différents menus.

Une réflexion importante sur l'ergonomie du joystick et du geste à réalisé a également eu lieu.

Le montage 0.3 devra regrouper l'ensemble de ces fonctionnalités. Il présentera une interface complète : contrôle des moteurs inertiels pas-à-pas et des scanners piézoélectriques, communication entre les différentes cibles, utilisation de joysticks en forme de stylo (ce qui n'a pas encore été testé avec le montage 0.2), et bien entendu assurer le lien direct entre les forces nanométriques et celles appliquées au joystick.

3.4.2 Retour de Force Tridimensionnel

La direction de la force mesurée est une question importante pour l'interface *Nano-Pince*.

La mesure du diapason est le gradient de la force selon Z. Même si nous avons vu que cette information peut être suffisante pour le retour haptique, elle n'en demeure pas moins une information scalaire. Le mouvement du joystick étant en 3D, le retour de force se doit d'être vectoriel.

Cette étape représente un grand pas dans le domaine de la réalité augmentée. L'information réellement mesurée est « grossie » par une information virtuelle déterminée par des algorithmes de prédiction.

Le calcul de la direction de la force pour la *Nano-Pince* a pu être aborder pendant le stage. Il a été choisi que la force appliquée au joystick s'oppose au mouvement de l'utilisateur, ainsi ce dernier a toujours la sensation que l'objet est « devant lui ». Par tentatives successives d'approches sur l'objet par des directions différentes, l'utilisateur est capable de reconstituer le volume de l'objet par le toucher.

3.4.3 Contrôle Numérique

Le programme *Nano-Pince* ne comporte pas de contrôle numérique permettant d'asservir la position des pointes en fonction de la force. L'utilisateur est seul à piloter le mouvement des pointes avec pour information le retour haptique du joystick. Un utilisateur quelque peu « brutal » peut forcer l'approche de la pointe sur la surface malgré la force importante du retour haptique, endommagant ainsi l'échantillon.

Il est alors envisageable d'inclure une protection numérique stoppant le mouvement de la pointe, et donc du joystick (force virtuelle de raideur infini : mur) lorsque la force d'interaction devient trop grande (seuil paramétrable).

Il est de plus envisagé de pouvoir appliquer une force précise et de façon constante pendant l'observation au rayon X sur le nano-objet. La conservation de cette force précise est impossible par l'humain. Il faudra alors ajouter un contrôle numérique (contrôleur PID ou autres) permettant d'asservir la position en fonction d'une force de référence à appliquée à l'objet. Ce contrôleur nécessitera probablement l'ajout d'une nouvelle cible de calcul : FPGA réalisant cette fonction.

3.4.4 Modélisation d'environnements *Nano-Pince* virtuels

Un des objectifs du stage était la création d'environnements virtuels basés sur le système *Nano-Pince* en reprenant les acquis du développement de la simulation `AFM` (cf annexe E.4).

Cet objectif n'a pu être réalisé pendant le stage mais il n'en reste pas moins d'actualité. Cette simulation possède deux aspects principaux :

1. La reproduction des phénomènes physiques nanométriques (présence d'un nano-objet, des deux sondes AFM, considération des forces d'interactions :Van der Waals, Pauli, capilarité, etc.). Les éléments de l'environnement sont contrôlables à partir du TGR. Cette simulation permet alors d'étudier différentes stratégies de manipulations et d'approches de l'objet sans gaspiller des échantillons et du temps pour ces essais successifs.
2. L'utilisation de cette simulation en parallèle de la téléopération classique. Ainsi, l'actionnement du TGR active à la fois les éléments de la simulation et les éléments du montage. Si la simulation est suffisamment proche de la réalité, elle peut fournir un nombre important d'informations (visuel, guidage, etc.) à l'utilisateur lors de la téléopération.

On peut donc imaginer que les éléments virtuels soient définis à partir d'une image (AFM) de l'échantillon. Par reconnaissance d'image, les différents volumes indépendants sont créés : un nano-objet qui est plus simplement une sphère, la surface sur laquelle se trouvent les autres volumes et enfin les deux pointes AFM, reconstituant virtuellement l'échantillon nanométrique.

Ce principe est déjà utilisé, de façon plus ou moins proche, par plusieurs nanomanipulateurs [16][9][8][22].

Conclusion

L'ensemble du travail réalisé durant ce stage a permis le développement et la conception d'un téléopérateur couplant une pince à sondes AFM à diapason et un système haptique.

Il a notamment mis à jour les difficultés rencontrées pour la réalisation d'une interface Temps-réel. Il a été démontré qu'une interface Labview opérant sur l'OS Windows du PC hôte, accompagné de l'électronique commerciale Nanonis comme seule électronique du montage ne permettait pas de générer un retour haptique sur le TGR Ergos. Cette configuration comporte trop de limites, liées à la temporisation minimale de l'OS Windows et à la communication entre cet OS et l'OS Nanonis limitant la vitesse d'échange des signaux.

Ce premier montage a permis d'acquérir une expérience suffisante pour déterminer les améliorations possibles du système. Différentes options étaient envisageables : l'ajout d'un FPGA pour assurer le contrôle de la pointe, ou bien d'un DSP. En partagant l'expérience du laboratoire ICA, familier de la programmation d'environnements virtuels associés à l'utilisation du TGR, et en analysant les objectifs futurs du nanomanipulateur, l'utilisation d'un DSP a été préférée au FPGA.

Une première version de l'interface *Nano-Pince* utilisant le DSP SI-C6713DSP de la société Sheldon Instruments a pu être réalisé pendant le stage. Le couplage temps-réel d'une sonde AFM et du TGR Ergos ainsi obtenu a permis de réaliser quelques expériences qualitatives visant à valider les performances du nanomanipulateur. Après de très bons résultats, l'utilisation d'un DSP dans la configuration finale de la *Nano-Pince* est clairement validée. Ainsi, une première scène virtuelle a été conçue afin de définir un espace de travail cubique dans lequel l'utilisateur peut se déplacer librement. Grâce à cette scène virtuelle, les mouvements de l'utilisateur sont identiques aux mouvements de la pointe.

Les perspectives naturelles du travail réalisé pendant ce stage sont l'amélioration de l'interface 0.2 afin d'y inclure tous les éléments de la tête AFM de la *Nano-Pince* : contrôle des moteurs de deux sondes AFM actives pour des retours de forces indépendants sur les deux joysticks 3D. L'étape suivante sera alors de caractériser et d'utiliser le nanomanipulateur ainsi obtenu et de déterminer avec précision ses performances.

Pour terminer cette conclusion et ce rapport, je voudrais évoquer la satisfaction éprouvée tout au long de ce stage. J'ai pu découvrir un nouvel environnement de travail hautement interdisciplinaire, pour lequel la camaraderie et l'entraide prennent une place essentielle afin de comprendre les problématiques de chacun et d'établir un langage commun entre nous.

Ce stage en laboratoire m'a convaincu de poursuivre cette aventure et de découvrir un peu plus le milieu de la Recherche en effectuant une thèse au sein de l'ICA et de l'Institut Néel sur le développement d'environnements virtuels associés à la *Nano-Pince*. Je souhaite ainsi ne pas quitter un projet tout juste naissant et passionnant alors qu'il me reste encore beaucoup à apporter et autant à apprendre.

Annexe A

Dynamic Mode AFM

En mode dynamique le cantilever est modélisé par un système {ressort + masse} dont on force l'oscillation au voisinage de sa fréquence de résonance ν_0. Le levier se comporte alors comme un oscillateur harmonique à 1 dimension [15].

L'équation du système est alors :

$$m\ddot{z} = F_{ext} + F_{ho} + F_{am}$$

pour laquelle F_{ext} est la force d'excitation, F_{ho} la force de Hooke et F_{am} la force dûe à l'amortissement. Cette équation s'écrit également :

$$m\ddot{z} = A_e k \cos\omega t - kz - \gamma\dot{z} \tag{A.1}$$

avec m la masse effective de la sonde, k la raideur du levier et γ le coefficient d'amortissement. A_e est l'amplitude de l'excitation.

On définit la fréquence de résonance du système et le facteur de qualité :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{A.2}$$

$$Q = \frac{m * \omega_0}{\gamma} = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} \tag{A.3}$$

Ce qui nous donne l'équation finale :

$$\ddot{z} + \frac{\omega_0}{Q}\dot{z} + \omega_0^2 z = A_e\omega_0^2 \cos\omega t \tag{A.4}$$

La solution du régime permanent de l'équation différentielle A.4 est de la forme suivante :

$$Z(t) = A(\omega) * \cos\left(\omega t + \phi(\omega)\right) \tag{A.5}$$

avec les équations de l'amplitude et de la phase (voir figure A.1) :

$$A(\omega) = \frac{A_e Q\omega_0^2}{\sqrt{\omega^2\omega_0^2 + Q^2(\omega_0^2 - \omega^2)^2}} \tag{A.6}$$

$$\phi(\omega) = \arctan\frac{\omega\omega_0}{Q(\omega_0^2 - \omega^2)} \tag{A.7}$$

Les équations données ci-dessus sont valables en absence d'interactions pointe-surface. En effet, lorsque la pointe est suffisamment proche de la surface, les interactions créées modifient l'équation A.4 en rajoutant un terme supplémentaire. La nouvelle équation du système devient :

$$\ddot{z} + \frac{\omega_0}{Q}\dot{z} + \omega_0^2 z = A_e\omega_0^2 \cos\omega t + \frac{F_{p-s}(z)}{m} \tag{A.8}$$

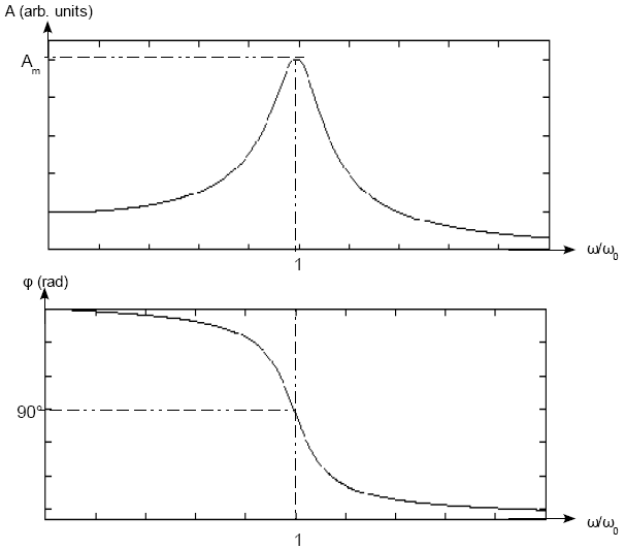


FIG. A.1 – Courbes théoriques des équations A.6 et A.7

pour laquelle $F_{p-s}(z)$ est la force correspondant à l'interaction pointe-surface.

Résoudre cette équation est alors beaucoup plus complexe puisque la force d'interaction $F_{p-s}(Z)$ n'est, à priori, pas connue. C'est pourquoi nous considérerons une approximation au premier ordre de $F_{p-s}(Z)$:

$$F_{p-s}(z) \approx F_{p-s}(z_0) + z\frac{\partial F_{p-s}}{\partial z}(z_0) \tag{A.9}$$

où z_0 est l'altitude moyenne du levier au dessus de la surface.

Cette approximation est justifiée car nous ne considérons que des **petites oscillations** autour de la position z_0 et un faible gradient de force.

L'équation A.8 devient alors :

$$\ddot{z} + \frac{\omega_0}{Q}\dot{z} + \left[\omega_0^2 - \frac{1}{m}\left(\frac{\partial F_{p-s}}{\partial z}\right)\right] z = A_e\omega_0^2 \cos\omega t + \frac{F_{p-s}(z_0)}{m} \tag{A.10}$$

où $\frac{F_{p-s}(z_0)}{m}$ est une constante et n'inclut donc qu'une déformation statique du levier.

La nouvelle équation de la fréquence de résonance tient compte du nouveau terme dû à l'interaction pointe surface :

$$\omega_{01} \approx \omega_0 \left[1 - \frac{1}{2k}\left(\frac{\partial F_{p-s}}{\partial z}\right)\right] \tag{A.11}$$

Dans ce mode, plusieurs variables sont mesurables pour l'asservissement en position Z_{ech} de l'échantillon :

L'Amplitude En effet, l'amplitude de l'oscillation, à fréquence donnée, varie lorsque la résonance du système est modifiée. On se place donc à une fréquence proche de la fréquence de résonance ω_0 mais pas égale, idéalement légèrement plus faible que ω_0. Il est ainsi possible de distinguer si la force est attractive ($\partial A > 0$) ou répulsive ($\partial A < 0$). Cette technique n'est pas utilisée pour le mode non contact car la variation d'amplitude est très faible, elle est plus couramment utilisée pour le mode Tapping. La formule de ∂A en fonction du gradient de force est :

$$\partial A = \left(\frac{2A_eQ}{3\sqrt{3}k}\right) * \frac{\partial F_{p-s}}{\partial z} \tag{A.12}$$

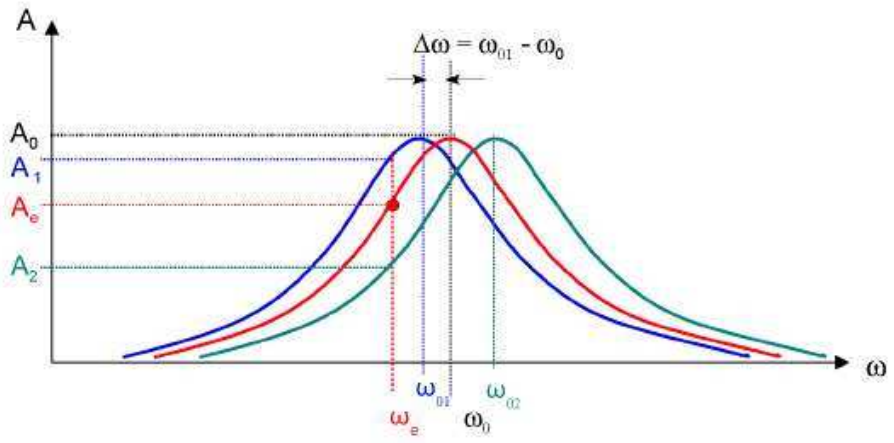


FIG. A.2 – Décalage de la courbe de résonance ; Fréquence d'excitation ω_e ; A_0 amplitude en absence d'interaction, A_1 amplitude lorsqu'une force attractive est présente, A_2 pour une force répulsive

La Phase De la même façon que l'amplitude, la phase dépend aussi de la fréquence de résonance du système. Elle varie donc lorsqu'une interaction pointe-surface apparaît. C'est la technique utilisée pour le mode non contact car la variation de phase est plus importante que pour l'amplitude. Il faut cependant veiller à rester dans le domaine linéaire du signal. La formule de $\partial\phi$ en fonction du gradient de force est :

$$\partial\phi = \frac{Q}{k} * \frac{\partial F_{p-s}}{\partial z} \tag{A.13}$$

Par cette méthode, il est possible d'atteindre des résolutions latérales de l'ordre de 1Å sous certaines conditions :

- utiliser une pointe de rayon de courbure très faible ($\kappa < 10nm$),
- distance pointe surface modérée ($3 \leq d \leq 6$Å),
- environnement sous Ultra Vide,
- mode non contact de grande amplitude ($\triangle A \gg d_{min}$).

La Fréquence Il est également possible d'utiliser la fréquence pour asservir la position Z_{ech} de l'échantillon. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser une PLL (Phase-Locked Loop) qui permet de contrôler la fréquence d'excitation du système pour maintenir la phase constante. Lors de l'apparition d'une interaction pointe-surface, ce n'est plus la phase qui varie mais la fréquence d'excitation du levier. Il n'y a pas, dans ce cas, de risque de sortir du domaine linéaire de la phase.

La formule de $\partial\omega$ en fonction du gradient de force est :

$$\partial\omega = -\frac{\omega_0}{2k} * \frac{\partial F_{p-s}}{\partial z} \tag{A.14}$$

On asservit ensuite la hauteur Z_{ech} de l'échantillon selon une fréquence d'excitation de consigne.

Bilan

On peut ici faire un bilan des différents montages possibles pour asservir la hauteur Z_{ech} de l'échantillon à partir des informations précédentes :

1. si la force d'excitation et la fréquence sont gardées constantes, on peut lire l'information grâce :
   - au changement de l'amplitude d'oscillation ou ;
   - au changement de phase entre la force d'excitation et l'oscillation en retour.
2. si la phase entre l'excitation et le signal de retour est gardée constante (par l'intermédiaire d'une boucle de rétroaction), on peut lire l'information grâce :

- au changement de l'amplitude d'oscillation ou ;
- au changement de la fréquence de résonance.

3. si l'oscillation et la fréquence sont gardées constantes (par l'intermédiaire d'une boucle de rétroaction), on peut lire l'information grâce :
   - à la force additionnelle nécessaire pour garder l'oscillation constante ou ;
   - au changement de phase entre la force d'excitation et l'oscillation en retour.
4. si l'amplitude des oscillations et la phase entre l'excitation et le signal en retour sont gardées constantes, on peut lire l'information grâce :
   - à la force additionnelle nécessaire pour maintenir les oscillations constantes ou ;
   - au changement de la fréquence de résonance

Ceci représente quatre possibilités d'obtenir la topographie d'un échantillon. La plus courante est la première solution, plus simple car ne nécessitant pas de boucle de contrôle suplémentaire. Cependant elle est impossible dans le vide car l'amortissement est trop faible et le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre est très long. Le mode 2 utilise une boucle de rétroaction pour maintenir constante la phase entre l'excitation et le signal en retour en adaptant le fréquence de l'excitation. C'est ce qu'on appelle une Phase Locked Loop. Dans le mode 3 la boucle de rétroaction maintient l'amplitude des oscillations constante en adaptant l'excitation. Le mode 4 utilise ces 2 boucles de rétroaction simultanément (cf figure A.3). L'électronique du montage est décrit dans le section 1.2.3 du manuscrit.

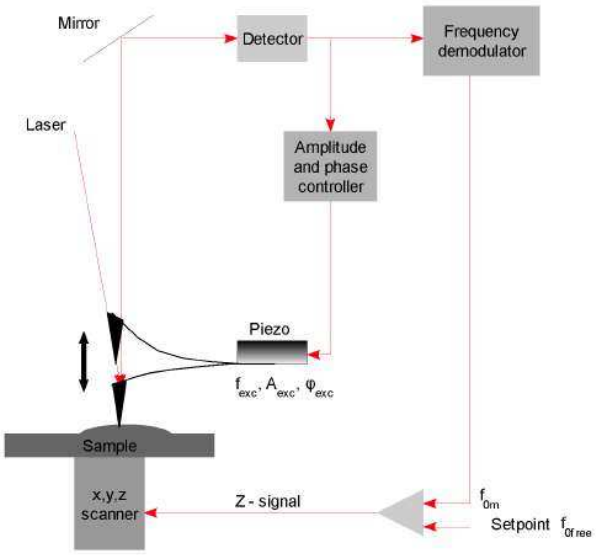


FIG. A.3 – Illustration schématique de l'asservissement selon le mode 4 [15]

Annexe B

Les forces à l'échelle nanoscopique

Lorsque la sonde AFM cartographie la surface d'un matériau, la pointe est soumise à des interactions dont la portée et l'origine sont diverses. Elles se résument par l'équation suivante :

$$\vec{F} = \vec{F}_{LJ} + \vec{F}_{cap} + \vec{F}_{E/M} + \vec{F}_B \tag{B.1}$$

Où $\vec{F}_{LJ}$ représente la force de Lennard Jones, $\vec{F}_{cap}$ la force de capillarité, $\vec{F}_{E/M}$ les forces électrostatiques et magnétiques et $\vec{F}_B$ la force d'origine chimique.

Force de Lennard Jones

La force dite de Lennard Jones est le regroupement de la force de Van der Waals et de la force de répulsion de Pauli (cf figure B.1).

La force de Van der Waals est une force à longue portée (quelques Å à quelques 100Å), c'est une interaction électrostatique de type dipôle-dipôle induits. Elle est attractive et son expression est $F = -\frac{\beta}{r^7}$ avec r la distance interatomique. Son ordre de grandeur est de $F \approx 5 * 10^{-13} N$ pour $r \approx 10nm$.

La force de répulsion de Pauli liée au principe d'exclusion de Pauli, lors de l'interpénétration des cortèges électroniques, agit à très courte portée (de l'ordre de l'Å), son expression est $F = \frac{\alpha}{r^{13}}$. L'ordre de grandeur de cette force est $F \approx 1 * 10^{-11} N$ pour $r \approx 0,16$Å .

On en déduit donc la formule de la force de Lennard Jones qui est la somme des deux expressions précédentes :

$$F_{LJ} = \frac{\alpha}{r^{13}} - \frac{\beta}{r^7} \tag{B.2}$$

Force de Capilarité

Pour les expériences menées dans l'air, une fine couche d'eau (quelques couches moléculaires) est présente à la surface de l'échantillon et sur la pointe. De ce fait, lorsque la distance pointe surface est de l'ordre du nanomètre, il se forme instantanément un ménisque d'eau entre la pointe et la surface. C'est ce pont liquide qui est à l'origine de la force de capillarité.

Pour limiter cette force, il faut travailler en atmosphère asséchée.

Force Electrostatique et Magnétique

La force électrostatique est une interaction électrostatique, comme son nom l'indique, entre des charges coulombiennes présentes sur l'échantillon et sur la pointe. Elle est toujours attractive.

La force magnétique est une interaction magnétique de type dipôle magnétique-dipôle magnétique. C'est une force de longue portée tout comme la force électrostatique.

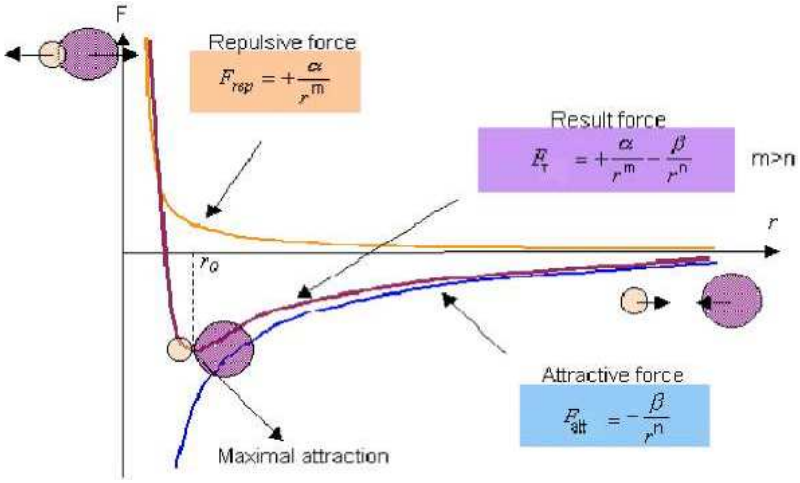


FIG. B.1 – Force de Lennard Jones entre 2 nano-objets séparés d'une distance r [15]

Force Chimique

Cette force n'est présente qu'en travaillant sous vide. Il reste alors des liaisons dites pendantes sur la pointe et sur la surface qui peuvent réagir chimiquement lors du contact. C'est cette force qui expliquerait la résolution atomique obtenue sous ultra-vide.

Annexe C

Fabrication des Pointes

Cette annexe présente la méthode utilisée pour fixer la pointe de tungstène sur le diapason [11].

Collage

Un fil de tungstène de $100\mu m$ de diamètre et de 2 cm de longueur est collé sur l'extrémité de l'un des bras du diapason. Une petite quantité de colle *araldite* est tout d'abord appliquée sur le bras puis le fil de tungstène est plongé dans la colle. L'araldite est une colle à deux composants, constituée d'une résine époxyde et d'un un agent polymérisant, le 1,4,7,10-tétraazadécane. Au contact de ces deux composants, un polyépoxyde est formé.

Gravure

Il faut ensuite affiner la forme de la pointe. Nous utilisons pour cela la technique appelée *lamellae dropoff technique*.

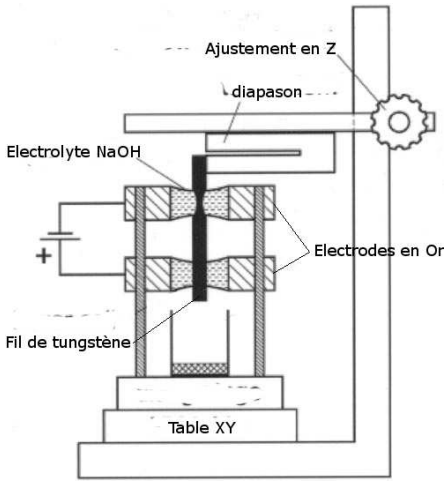


FIG. C.1 – Illustration du montage de la technique *double lamellae dropoff*

Le système comporte deux électrodes en or en forme d'anneaux (voir figure C.1). Les deux électrodes sont soumis à une tension de 4 à 6V. Une lame de NaOH est appliquée au centre des anneaux comme électrolyte. Le fil de tungstène est plongé à travers les deux lames d'électrolyte. Un courant de gravure se crée alors le long du fil et induit les réactions chimiques suivantes :

$$cathode : 6H_2O + 6e^- \leftrightarrow 3H_2 + 6OH \tag{C.1}$$

$$anode : W(s) + 8OH^- \leftrightarrow WO_4^{2-} + 6e^- \tag{C.2}$$

$$total : W(s) + 8OH^- + 2H_2O \leftrightarrow WO_4^{2-} + 3H_2 \tag{C.3}$$

Après un temps de gravure d'environ 5 minutes, le fil devient suffisamment fin et la partie inférieure tombe sous son poids. Reste alors la partie supérieure utilisée pour la pointe. Sa forme est très fine, le rayon de courbure à son extrémité est inférieur à $100nm$ (cf figure C.2).

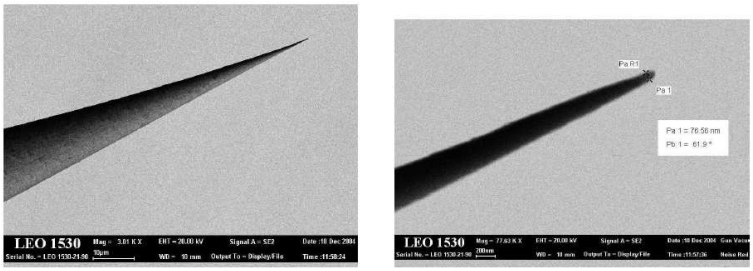


FIG. C.2 – Images SEM d'une pointe en tungstène gravée avec le détail de l'extrémité (droite)

Annexe D

Capteurs LVDT [2]

Les capteurs LVDT, Linear Variable Differential Transformer, sont utilisés dans de nombreuses applications scientifiques et industrielles pour leur grande linéarité et leur bonne résolution. Ils sont également résistants aux environnements hostiles (température, pression, radioactivité...). Ils se composent d'un transformateur comportant un enroulement primaire et deux enroulements secondaires, symétriques par rapport au primaire (cf figure D.1). Le couplage magnétique entre primaire et secondaires est assuré par le noyau ferromagnétique mobile dont on mesure la position.

L'enroulement primaire est alimenté par une tension sinusoïdale $e_1 = E_1 * cos(\omega t)$ et les enroulements secondaires sont reliés en opposition de façon à ce que les forces électromotrices se soustraient.

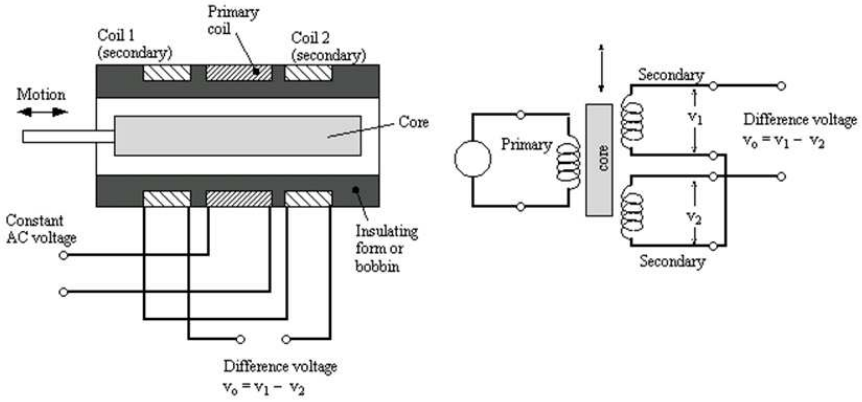


FIG. D.1 – Bobinage des LVDT

$$v_1 = M_1 \frac{di_1}{dt}$$
$$v_2 = M_2 \frac{di_1}{dt}$$
$$v_0 = v_1 - v_2 = (M_1 - M_2) \frac{di_1}{dt}$$

Pour lesquels :
v_1 = la force électromotrice induite de l'enroulement secondaire 1 ;
v_2 = la force électromotrice induite de l'enroulement secondaire 2 ;
M_1 = coefficient d'induction mutuelle entre le primaire et l'enroulement secondaire 1 ;
M_2 = coefficient d'induction mutuelle entre le primaire et l'enroulement secondaire 2 ;
v_0 = tension aux bornes des enroulements secondaires connectés en série.

La variation de ces coefficients en sens contraire en fonction de x entraîne une bonne compensation des non-linéarités autour de $x = 0$; en effet, si l'on a :

$M_1 = M_0 + ax + bx^2 + \ldots$ et par symétrie
$M_2 = M_0 - ax + bx^2 + \ldots$ nous obtenons finalement

$$M_1 - M_2 = 2ax \text{ et } v_0 = 2ax\frac{di_1}{dt}$$

La tension de sortie v_0 varie donc linéairement en fonction de x de part et d'autre de la position d'origine $x = 0$.

Annexe E

Le Langage CORDIS

Nous évoquions dans le chapitre 2 le support DSP utilisé par l'ICA pour la programmation des environnements virtuels : le DSP Toro. Cette annexe expose les bases du système de modélisation développé par l'ICA pour la programmation de ce DSP. Ce système permet la simulation numérique d'objets physiques manipulables, audibles et visibles.

E.1 Les briques de CORDIS

CORDIS est composé de deux types de briques, les points M et les points L. Les points M peuvent être définis comme les points de matière. Les points L sont une représentation des interactions entre les points de matière. En effet, d'après le formalisme de CORDIS, les points M reçoivent des grandeurs intensives, telle que les forces, et ils renvoient des grandeurs extensives, telle que la vitesse ou l'accélération. Au contraire, les points L reçoivent des grandeurs extensives et renvoient des grandeurs intensives.

On peut alors comprendre les règles qui définissent les connexions entre les points M et L.

- On ne peut connecter que deux points de types opposés (les éléments de matière sont reliés par des interactions, les interactions agissent sur la matière) ;
- On peut connecter un point M à plusieurs points L, le point M reçoit alors la somme des grandeurs intensives des points L (un objet peut subir plusieurs forces, la force totale est alors la somme des forces appliquées sur lui) ;
- On ne peut connecter un point L qu'à un seul point M (une force ne s'applique qu'en un seul point).

Grâce à ces hypothèses, on peut définir deux types de modules :

- le module MAT, pour matière. Il est composé d'un seul point M ;
- le module LIA, pour liaison. Il est composé de *deux* points L renvoyant deux forces opposées ($F_n^1 = -F_n^2$), selon le principe de l'action et de la réaction. Il existe plusieurs types de modules LIA mais nous n'en présenterons que deux dans la partie suivante. Les autres modules étant basés sur ces deux principaux.

E.2 Les équations de la physique

Nous avons déterminé, dans la partie précédente, que le **module MAT** représente une masse ponctuelle. Il respecte donc la relation fondamentale de la dynamique $\vec{F}(t) = M.\vec{\gamma}(t)$.

Son algorithme est donc défini comme suit :

$$\begin{aligned} \frac{F_n}{M} &= \ddot{X}_n \\ &= \dot{X}_{n+1} - \dot{X}_{n-1} \\ &= (X_{n+1} - X_n) - (X_n - X_{n-1}) \end{aligned}$$

où X est la position de la masse, $\dot{X}$ sa vitesse et $\ddot{X}$ son accélération.

On en déduit l'équation de la position à l'instant $n+1$:

$$X_{n+1} = 2X_n - X_{n-1} + F_n/M \tag{E.1}$$

De la même façon, on peut calculer les algorithmes des **modules LIA**,

1. module `liaison élastique` :
   la liaison élastique est régie par l'équation $\vec{F}(t) = K.\vec{x}(t)$. On en déduit facilement l'algorithme de ce module :
   $$F_n = K(X_n^2 - X_n^1) \tag{E.2}$$
   où X_n^1 est la position du premier point L de la liaison à l'instant n et X_n^2 la position du deuxième point L.
2. module `liaison visqueuse` :
   L'équation de cette force est de la forme $\vec{F}(t) = -Z.\vec{v}(t)$ où Z est le coefficient de viscosité et $\vec{v}$ la vitesse, d'où l'algorithme :
   $$F_n = -Z.((X_n^2 - X_{n-1}^2) - (X_n^1 - X_{n-1}^1)) \tag{E.3}$$

On constate bien que les modules MAT fournissent une position (extensive) à partir de forces, et les modules LIA fournissent une force (intensive) à partir de positions.

La figure E.1 rend compte du processus de simulation en fonction du temps, et les traits en pointillés (cycle de calcul) montrent qu'une variable est calculée aussi à l'aide de sa valeur à l'instant précédent.

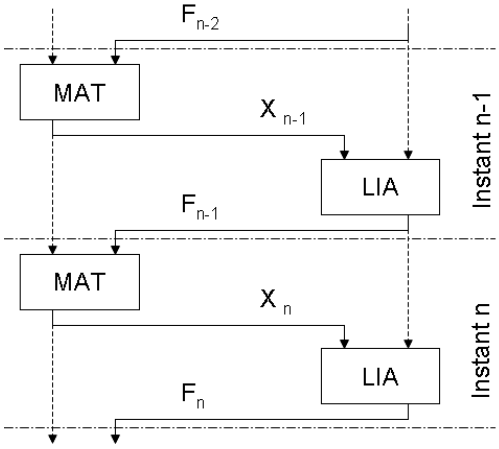


FIG. E.1 – Cycles de calcul du simulateur CORDIS

E.3 Un lien entre le monde réel et le monde virtuel

Nous avons donc deux univers. Il nous faut maintenant comprendre la correspondance des unités de chacun d'eux.

D'un côté, il y a le monde réel dans lequel se trouve une masse m (masse du levier), les forces f appliquées sur cette masse définies par la raideur k et la viscosité z (provenant de l'utilisateur et des actionneurs) et la position x de cette masse.
De l'autre côté, le monde virtuel avec la représentation de cette masse, notée M, les forces virtuelles F définies par la raideur K et la viscosité Z et la position dans ce deuxième univers X.

Nous avons déjà vu la relation entre x et X et entre f et F lors des différentes amplifications de la chaîne qui relie ces deux grandeurs (cf partie 2.2.3).

Pour rappel,

$$f = \beta_f * F$$

$$x = \alpha_x * X$$

Les deux coefficients α_x et β_f sont donc nos moyens d'action sur le monde virtuel. Mais ils ne sont pas les seuls coefficients à considérer. En effet, il existe également des coefficients qui lient la masse réelle m et la masse virtuelle M, les raideurs k et K, et les coefficients de viscosité z et Z.

Ces coefficients α_m, α_k et α_z sont définis sur la figure E.2. Ils mettent en relation des grandeurs réelles et des grandeurs virtuelles mais ne sont pas pour autant directement contrôlables par l'utilisateur, ni numériquement, ni analogiquement. En effet, seuls α_x et β_f sont modifiables. Les coefficients α_m, α_k et α_z dépendent de α_x et β_f.

Déterminons maintenant cette relation. Nous avons pour le module `MAT` les équations :

$$M * \triangle_2 X = F \text{ et } m * \frac{d^2}{dt^2} x = f$$
$$\text{avec } M = \alpha_m * m,\ f = \beta_f * F \text{ et } X = \alpha_x * x$$

On en déduit la relation suivante :

$$m * \beta_f * \alpha_m * \triangle_2 \alpha_x x = f$$
$$m * \beta_f * \alpha_m * T^2 * \alpha_x \frac{d^2 x}{dt^2} = f$$

Où T est la période d'échantillonnage du signal généré par le DSP.

Et finalement :

$$\alpha_m * \beta_f * \alpha_x * T^2 = 1 \tag{E.4}$$

On peut prouver de la même façon les équations suivantes pour le module `LIA` :

$$\alpha_k * \beta_f * \alpha_x = 1 \tag{E.5}$$

$$\alpha_z * \beta_f * \alpha_x * T = 1 \tag{E.6}$$

Ce qui donne la relation recherchée qui relie tous nos coefficients :

$$\alpha_k = \alpha_z * T = \alpha_m * T^2 = \frac{1}{\beta_f * \alpha_x} \tag{E.7}$$

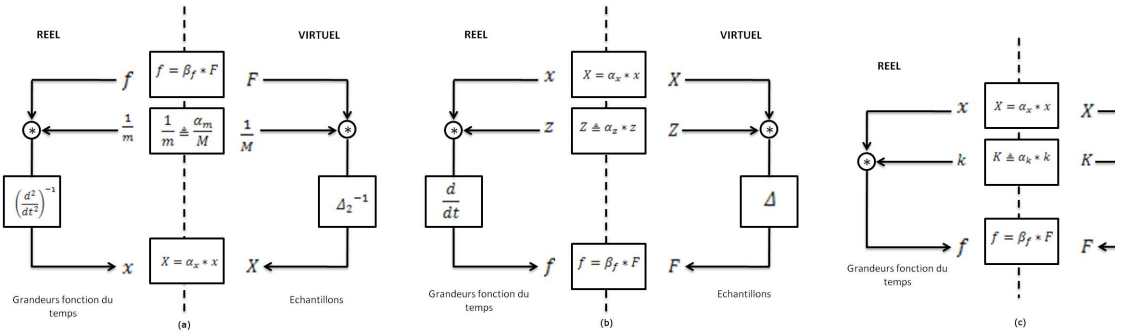


FIG. E.2 – Relation entre le réel et le virtuel (a) MAT particule, (b) Liaison élastique, (c) liaison visco élastique

E.4 Exemples de Simulations

Les trois simulations présentées ici sont des simulations 2D. L'utilisateur déplace un volume dans le plan de l'écran à l'aide du joystick.

Simulation `test_a_8`

Ce programme de simulation est utilisé pour la calibration du TGR. Son environnement graphique contient un quadrillage ainsi qu'un indicateur de position des LVDTs (segments blancs numérotés de 1 à 8, figure E.3). La ligne de référence (ligne verte) représente la position $x = 0$ et qui correspond au levier posé sur la cale de $10mm$. Chaque graduation du quadrillage correspond à un déplacement de $2mm$ des LVDTs, elles permettent la callibration du Gain Gx avec les cales de $8mm$ et $12mm$. Pour le retour de force, cette simulation envoie une force $F = kx$(liaison élastique) sur chacun des actionneurs pour maintenir la position $x = 0$.

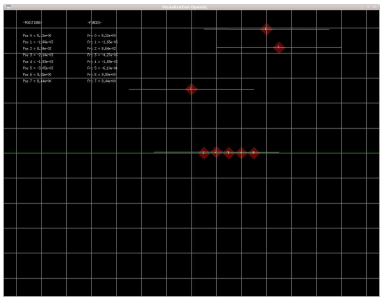


FIG. E.3 – Simulation `test_a_8` de ERGOS

Simulation `ERGOS`

L'environnement de cette simulation est un E (figure E.4). L'utilisateur contrôle une boule à l'intérieur du E qui ne peut pas en sortir. Le programme simule donc un contact dur (mur) à chaque fois que la boule entre en contact avec les bords du E. L'utilisateur peut donc « redessiner » le E par le toucher. Ce programme démontre la grande performance du système mécanique du TGR, capable de réagir très rapidement et avec une grande stabilité.

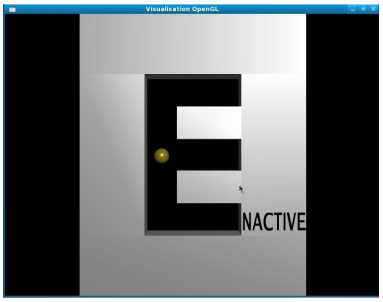


FIG. E.4 – Simulation **E** de ERGOS

Simulation `AFM`

Cette simulation est la plus intéressante dans notre cas puisqu'elle simule l'interaction entre une pointe AFM et une surface, en ne considérant que la force de Lennard Jones.

L'environnement graphique est composé d'une surface, d'une pointe AFM et d'un moteur piezo. La surface est constituée de plusieurs sphères, représentant les atomes de cette surface, chaque sphère est liée à ses voisines directes par une interaction élastique (cf section 2.2.4).

La pointe AFM est représentée par une sphère grise simulant le dernier atome d'une pointe AFM idéale (cf figure E.6). Cette sphère est liée par une interaction de type Van der Waals avec chacune des particules de la surface. La raideur de cette interaction élastique varie en fonction de la distance entre les particules selon la courbe, figure E.5

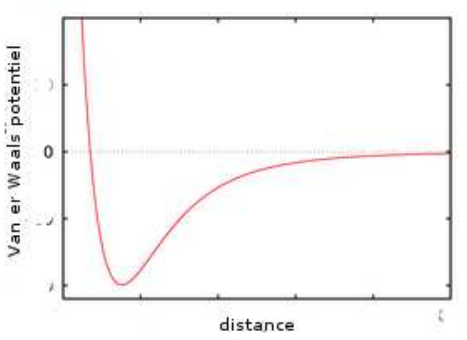


FIG. E.5 – Potentiel de Van der Waals

La pointe est également liée par une interaction élastique, qui simule le comportement linéaire d'un cantilever, au moteur piézoélectrique. Ce moteur est représenté par une sphère orange, c'est cette sphère que contrôle l'utilisateur. La force réelle appliquée sur le joystick est liée à la force virtuelle appliquée sur la sphère orange (force élastique du cantilever). L'utilisateur ressent donc les tensions du cantilever en fonction des interactions pointe-surface : attractions, répulsions, sauts au contact, etc.

Certains paramètres, tels que les raideurs, les masses ou les viscosités sont modifiables par l'utilisateur.

Le but est donc de faire ressentir à l'utilisateur, par l'intermédiaire du TGR, les interactions du nano monde. Cette simulation a été développée lors de la thèse de Sylvain Marliere et est utilisée pour certains TP des masters N^2 et NanoTech de Grenoble.

Bien que le montage de la Nano Pince soit un peu différent (utilisation d'un diapason à la place du cantilever et présence de 2 pointes), nous pouvons nous inspirer de cette simulation pour créer des simulations spécifiques à l'environnement Nano-Pince.

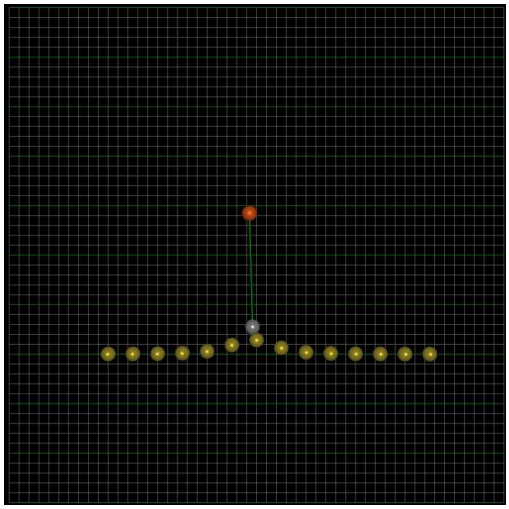


FIG. E.6 – Simulation `TP_Nano` de ERGOS

Annexe F

Calcul des coefficients de la matrice de transposition entre les coordonnées (P_1, P_2, P_3) du mouvement de base ERGOS et les coordonnées cartésiennes (X,Y,Z) de l'espace

Le calcul de la position du joystick (centre de la sphère noire) est effectué grâce aux coordonnées des points A, B et C (cf figure F.1(a)). Ces points représentent le centre des 3 liaisons rotules.

F.1 Définition du repère

Le repère est défini comme suit :

Le plan XY est le plan horizontal, Z est vertical. L'origine du repère est le centre du triangle équilatéral (ABC) lorsque toutes les tranches sont à mi-hauteur.

Les coordonnées des points A, B, C sont alors :

$$A = \begin{pmatrix} -14 \\ 8 \\ Z_A \end{pmatrix} \qquad B = \begin{pmatrix} 0 \\ -16,2 \\ Z_B \end{pmatrix} \qquad C = \begin{pmatrix} 14 \\ 8 \\ Z_C \end{pmatrix}$$

L'unité utilisée est le millimètre. $(\ Z_A \quad Z_B \quad Z_C \ )$ est obtenu à partir des signaux de position des LVDT $(\ P_1 \quad P_2 \quad P_3 \ )$:

$$\begin{pmatrix} Z_A \\ Z_B \\ Z_C \end{pmatrix} = a * \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{pmatrix} \tag{F.1}$$

où $a = 1,1mm/V$.

Le centre de la sphère noire est alors l'extrémité d'un vecteur de $65mm$ normal au plan ABC (cf figure F.1(b)). Ces coordonnées sont calculées grâce à l'équation du vecteur normal à un plan.

F.2 Montage 0.1

Pour le montage 0.1, seules les coordonnées XY sont nécessaires pour le joystick n°1. La coordonnée Z est calculée à partir d'une des tranches du joystick n°2.

Les équations de X et Y sont :

$$X = 1,1 * 24,2 * (P_3 - P_1) \tag{F.2}$$

$$Y = 1,1 * 14 * (P_3 + P_1 - 2P_2) \tag{F.3}$$

On en déduit la matrice de transfert entre le repère vertical des tranches et le repère cartésien :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = 1,1 * \begin{bmatrix} -24,2 & 0 & 24,2 & 0 \\ 14 & -28 & 14 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} \tag{F.4}$$

F.3 Montage 0.2

Pour le montage 0.2, seules 3 tranches sont utilisées pour le calcul de XYZ. Le calcul se déroule cette fois en deux étapes. Un premier vercteur (xyz) est calculé comme précédemment, sauf pour la coordonnée z qui est déterminée à partir de la moyenne des signaux P_1, P_2 et P_3 des trois tranches :

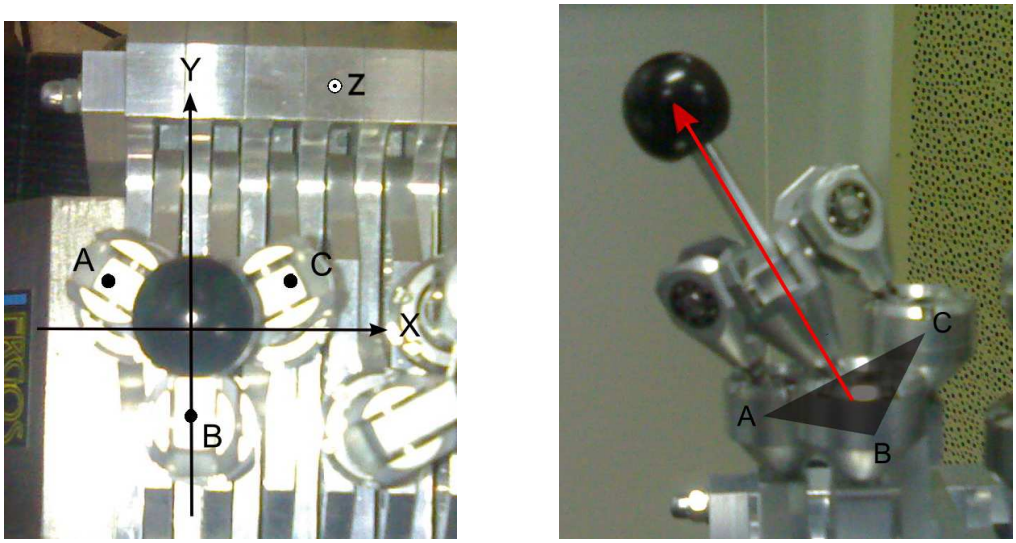
$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = 1,1 * \begin{bmatrix} -24,2 & 0 & 24,2 \\ 14 & -28 & 14 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} \tag{F.5}$$

La coordonnée Z n'est pas calculée à partir des coordonnées du plan ABC comme X et Y. Nous négligeons ainsi la variation de hauteur ΔZ de la position de la sphère lorsque l'on déplace le joystick sur X ou Y (inclinaison du joystick).

Une normalisation est ensuite effectuée :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{65}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} * \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \tag{F.6}$$

Cette étape n'est pas nécessaire pour le montage 0.1 puisque une calibration du mouvement est effectuée à chaque démarrage du système.



(a) (b)

FIG. F.1 – Illustration du repère cartésien utilisé pour le calcul de la position du joystick (centre de la sphère noire) par l'intermédiaire des points A, B, C, centres des liaisons rotules

Table des figures

1 Vue du site de l'ESRF v
2 Les différents domaines de longueur d'onde v
3 Schéma de l'accélérateur vi
4 Schéma du système de gestion du faisceau vi

1.1 Illustration schématique d'un AFM 1
1.2 Schéma et propriétés du diapason [19] 4
1.3 Oscillateurs couplés 4
1.4 Courbe de résonance d'un diapason excité mécaniquement. Le courant est mesuré à la sortie d'un amplificateur courant/tension. Largeur à mi-hauteur de 10Hz pour une fréquence de résonance à 30kHz. 5
1.5 Interaction du diapason avec la surface d'un échantillon 6
1.6 Montage de la tête AFM 7
1.7 Schéma du module OC4 de l'électronique Nanonis (extrait du datasheet) 8
1.8 Schéma bloc du contrôleur proportionnel-intégral (architecture parallèle) 9
1.9 Schéma bloc du montage de la PLL 10
1.10 Exemples de Nanomanipulation par AFM 11
1.11 Montage de la tête de la Nano-Pince 12
1.12 Bilan du montage Nano-Pince 13

2.1 Transducteur Gestuel Rétroactif (TGR) Ergos 14
2.2 L'actionneur de base ERGOS (a) un ensemble de 6 DoF (b) une tranche ouverte 16
2.3 Configuration de l'actionneur modulaire en tranches : bobine mobile pour flux partagé 16
2.4 Schéma bloc de l'interconnexion du transducteur gestuel 17
2.5 Le système haptique ERGOS 18
2.6 Schéma fonctionnel 19
2.7 Bilan carte Capteur 20
2.8 Bilan carte Puissance 20

3.1 Moteur Pas-à-Pas MechOnics (a) Logiciel de pilotage MechOnics (b) Illustration du contrôleur MechOnics (c) Assemblage de 3 moteurs permettant le positionnement en XYZ 22
3.2 (a) Amplificateur HT PiezoJena NV 40/3 CLE (b) Amplificateur HT Nanonis 23
3.3 (a) Câble sub-D 37pin reliant le DSP Toro au TGR Ergos (b) Boîtier vampire monté sur le câble pour en extraire les signaux échangés (c) Connexion possible avec le reste du montage . 24
3.4 Représentation du volume de déplacement d'un joystick 3D Ergos en sauvegardant les coordonnées de 5000 positions du joystick en mouvement. 25
3.5 Schématisation des connexions du montage *Nano-Pince* 0.1 26
3.6 Illustration de la face avant du mode *Manipulateur* 27
3.7 Organigramme du programme *Nano-Pince*, mode Manipulateur 28
3.8 Schéma du recouvrement spectrale lors de l'échantillonnage 29
3.9 Micro-manipulation 30
3.10 Ergonomie du joystick 31
3.11 Schématisation des connexions du montage *Nano-Pince* 0.2 33
3.12 Organigramme du programme *Nano-Pince* 0.2 34

3.13 Histogramme de la distribution du bruit du signal P1 35
3.14 Représentation des fonctions $f(z) = 1/z^{13}$ et $g(z) = 1/z^{14}$ en échelle logarithmique 36
3.15 Lien Nano-monde et Macro-monde 37
3.16 Micro-Manipulation 2 38

A.1 Courbes théoriques des équations A.6 et A.7 42
A.2 Courbe de résonance 43
A.3 Illustration schématique de l'asservissement selon le mode 4 [15] 44

B.1 Force de Lennard Jones entre 2 nano-objets séparés d'une distance r [15] 46

C.1 Illustration du montage de la technique *double lamellae dropoff* 47
C.2 Images SEM d'une pointe en tungstène gravée avec le détail de l'extrémité (droite) 48

D.1 Bobinage des LVDT 49

E.1 Cycles de calcul du simulateur CORDIS 52
E.2 Relation entre le réel et le virtuel (a) MAT particule, (b) Liaison élastique, (c) liaison visco élastique 53
E.3 Simulation `test_a_8` de ERGOS 54
E.4 Simulation **E** de ERGOS 54
E.5 Potentiel de Van der Waals 55
E.6 Simulation `TP_Nano` de ERGOS 55

F.1 Illustration du repère cartésien utilisé pour le calcul de la position du joystick (centre de la sphère noire) par l'intermédiaire des points A, B, C, centres des liaisons rotules 57

Liste des tableaux

2.1 Performances idéales d'un transducteur gestuel (VRAI Group) et caractéristiques du TGR ERGOS 17

Bibliographie

[1] J.J. Abbott, Z. Nagy, F. Beyeler, and B.J. Nelson. Robotics in the small. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, june 2007.

[2] H. Buyse. *Capteurs de position et de déplacement.* Université catholique de Louvain.

[3] Simon Le Denmat. *Construction et caractérisation d'un microscope à interférométrie fibrée.* PhD thesis, Université Joseph Fourier, 2008.

[4] A. Ferreira and C. Mavroidis. Virtual reality and haptics for nanorobotics. *IEEE robotics & automation Magazine*, september 2006.

[5] J.L. Florens. *Technologies de la simulation Interactive de Modeles Physiques Multisensoriels.* 2008.

[6] JL. Florens, A. Luciani, C. Cadoz, and N. Castagné. Ergos : Multi-degrees of freedom and versatile force-feedback panoply. *Proceedings of EuroHaptics 2004*, june 2004.

[7] S. Grange, F. Conti, P. Helmer, P. Routiller, and C. Baur. The delta haptic devive as a nanomanipulator, 2000.

[8] S. Grange, F. Conti, P. Helmer, P. Routiller, and C. Baur. *the delta haptic device.* VRAI Group, EPFL, 2000.

[9] M. Guthold, M.R. Falvo, W.G. Matthews, S. Paulson, S. Washburn, D.A. Erie, R. Superfine, P. Brooks F, and R.M. TaylorII. The nanomanipulator : A virtual-reality, interface to scanned-probe microscopes. *tech. rep.*, mars 2002.

[10] Fabrice Impériali. Nanomonde : les clés pour comprendre. *journal du CNRS*, 189, Octobre 2005.

[11] M. Kulawik, M. Nowicki, G. Thielsch, L. Cramer, HP. Rust, and HJ. Freund. A double lamellae dropoff etching procedure for tungsten tips attached to tuning fork atomic force microscopy/scanning tunneling microscopy sensors. *Review of scientific instruments*, february 2003.

[12] P. Letier, T. Saive, and I. Burda. Interface haptique pour nanomanipulateur afm. *Proceeding of the 6th National Congress on Theoretical and Applied Mechanics*, may 2003.

[13] G. Li, N. Xi, H. Chen, A. Saeed, and M. Yu. Assembly of nanostructure using afm based nanomanipulation system. *2004 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, VOLS 1- 5, PROCEEDINGS*, may 2004.

[14] Florence Marchi. *Habilitation à Diriger des Recherches.* 2009.

[15] Florence Marchi, A. Aubourg, A. Nigues, and Ph. Bezard. *Scanning Force Microscopy.* CIME Nanotech, 2009.

[16] Sylvain Marliere. *Conception et réalisation d'un nouvel outil a réalité mixte et retour d'effort pour toucher et creer les nanomondes.* PhD thesis, Institut National Polytechnique de grenoble, 2006.

[17] Jean-Yves Marzin. http ://www.spm.cnrs-dir.fr/nanosciences.

[18] Wouter H.J. Rensen. *Tuning Fork Tunes exploring new scanning probe techniques*, chapter Tuning forks as force sensors. 2002.

[19] Mario Rodrigues. *Bringing light into the nanoworld, What can you do with an atomic force microscope on top of your synchrotron radiation sample holder ?* PhD thesis, Université Joseph Fourier - Grenoble 1, 2009.

[20] Mario Rodrigues. *Bringing light into the nanoworld, What can you do with an atomic force microscope on top of your synchrotron radiation sample holder ?*, chapter An AFM in a synchrotron's sample holder. 2009.

[21] M. Sitti and H. Hashimoto. Tele-nanorobotics using atomic force microscope. *Proceedings of IEEE Int. conf. Intelligent Robots and Systems*, 1-3, october 1998.

[22] H.Z. Tan, L. Walker, R. Reifenberger, S. Mahadoo, G. Chiu, and A. Raman. A haptic interface for human-in-the-loop manipulation at the nanoscale. *Proceedings of WorldHaptics 2005*, mars 2005.

[23] Hui Xie, Dogan Sinan Haliyo, and Stéphane Régnier. A versatile atomic force microscope for three-dimensional nanomanipulation and nanoassembly. *Nanotechnology*, 20, may 2009.

Résumé

Ce rapport présente le travail réalisé au Surface Science Laboratory de l'ESRF entre février et juillet 2009 sur l'interface du projet Nano-Pince.

Ce projet vise à la création d'un nanomanipulateur 3D dont l'interface comporte 2 sondes AFM à diapason et un Transducteur Gestuel Rétroactif (TGR) afin de manipuler des nano-objets en 3 dimensions.

Le montage AFM à 2 diapasons a été réalisé par le SSL grâce à l'expérience acquise lors du développement de l'X-AFM, un AFM à diapason adaptable sur les lignes de lumière d'un synchrotron. Tout comme son prédécesseur, la Nano-Pince doit être utilisable sur les lignes de lumière.

Le TGR, développé par le laboratoire ICA de Grenoble, doit permettre l'actionnement des moteurs des 2 sondes AFM avec un renvoi Temps-Réel à l'utilisateur de l'information de force mesurée par le diapason.

Le travail de ce stage a permis de réunir ces 2 éléments pour les deux premières versions de l'interface Nano-Pince. Le langage de programmation choisi pour ces premières versions est Labview, les différentes cibles de calculs de l'interface du montage final ont pu être définies, le choix s'est porté sur l'utilisation d'un DSP pour réaliser le lien Temps-Réel entre la sonde AFM et le joystick à retour de force.

Mots clefs : Nanomanipulateur, Microscope à Force Atomique, Transducteur Gestuel Rétroactif, Labview, Temps-réel, Digital Signal Processor, Diapason, Réalité virtuelle, Systèmes haptiques, Nanonis

Abstract

The present report shows the work made at the Surface Science Laboratory (SSL) of the European Synchrotron Radiation Facility of Grenoble between Febuary and July 2009 about the Nano-Tweezers Project's interface.

The Nano-Tweezers Project aims at the creation of a nanomanipulator 3D whom the interface is composed of two tuning-forks Atomic Force Microscope (AFM) probes and a versatile force-feedback transducer.

The tuning-forks probes set-up has been realized at the SSL thanks to the experience acquired during the X-AFM development. The X-AFM is a tuning-fork AFM available on top of Synchrotron radiation sample holder. The Nano-Tweezers will use the same principle in order to be compatible with Synchrotron radiation.

The force-feedback transducer has been developed at the ICA (Informatics and artistic creations) laboratory of Grenoble. Through the force-feedback transducer, the user should control the tweezers motion and feel the force acting at the nanometer scale in order to adjust it.

This work has enabled to link these two systems. The first two versions of the Nano-Tweezers interface have been realized using Labview. To compute the real-time control of the probes by the transducer, a Digital Signal Processor has been programmed. The interface includes also the commercial SPM System Control Nanonis.

Key words : Nanomanipulator, Atomic Force Microscope, Versatile Force-feedback transducer, Labview, Real-Time, Digital Signal Processor, Tuning-Fork, Virtual reality, Haptic systems, Nanonis